

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

28.02.2025

CloudFridge *Lastausgleich und Effizienzsteigerung mittels Zustandserfassung von vernetzten Kältekreisläufen*

Projektnummer:888510

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	7. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01.12.2021
Projektende	28.02.2025
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	39 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Infineon Technologies Austria AG
AnsprechpartnerIn	DI Thomas Herndl
Postadresse	Babenbergerstraße 10, 8020 Graz, Austria
Telefon	+43 (676) 8205 4572
Fax	+43 (1) 5877070 200
E-mail	thomas.herndl@infineon.com
Website	www.infineon.at

CloudFridge

Lastausgleich und Effizienzsteigerung mittels Zustandserfassung von vernetzten Kältekreisläufen

AutorInnen:

Name (alphabetisch)	Firmen-/Forschungspartner
Andreas Lesch	<i>TDK Electronics GmbH & Co OG</i>
Christoph Schertz	<i>Infineon Technologies Austria AG</i>
Dailys Arronde Perez	<i>Universität Klagenfurt – Institut für Intelligente Systemtechnologien</i>
Hans-Peter Schögler	<i>Nidec Global Appliance Austria GmbH</i>
Hubert Zangl	<i>Universität Klagenfurt – Institut für Intelligente Systemtechnologien</i>
Marcus Koini	<i>TDK Electronics GmbH & Co OG</i>
Michael Moser	<i>Eologix sensor technology gmbh</i>
Thomas Herndl	<i>Infineon Technologies Austria AG</i>
Wolfgang Lang	<i>SES-TEC OG</i>

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Piezoelektrischer Generator für Energy Harvesting	6
3.2	Halbleiterintegration für energieautarke Sensorsysteme	12
3.3	Sensor System Integration	15
3.4	Energie Management und Optimierung	20
3.5	Systemintegration und Validierung	23
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	30
5	Ausblick und Empfehlungen	32
6	Literaturverzeichnis	32
7	Kontakt Daten	33

2 Einleitung

Erneuerbare Energiequellen wie Solarenergie oder Windenergie sind durch eine starke Variabilität charakterisiert. Diese stellt große Herausforderungen für das Stromnetz dar, da dieses die Variabilität der Quellen (und Verbraucher) ausgleichen muss. Der Ausgleich kann sowohl durch konventionelle Kraftwerke als auch durch Speicherung von Energie - beispielsweise mittels Pumpkraftwerken in Form von potentieller Energie - erreicht werden. Ein alternativer Ansatz, Energie in Form von Wärme (bzw. auch Kälte) zu speichern wird bislang kaum eingesetzt.

Angesichts der großen Anzahl von Kältekreisläufen in Kühlschränken, Wärmepumpen, Klimaanlage etc. (alleine in Europa werden pro Jahr rund 22 Millionen neue Kühlschränke laut APPLIA Home Alliance Europe Report 2020 verkauft; 2050 werden laut IEA 16% des globalen Bedarfs an elektrischer Energie für Kühlen und Gefrieren aufgewendet werden) stellen diese in ihrer Gesamtheit ein beträchtliches Potential für Energiespeicherung - insbesondere unter Verwendung von Phasenwechselspeichern - dar. Kälte/Wärme kann auf Vorrat „produziert“ werden, sodass die Speicher während Energiespitzen im Netz befüllt und bei Lastspitzen entleert werden können. Dazu ist jedoch eine genaue Erfassung und Kenntnis der Betriebszustände der Kältekreisläufe im Netz erforderlich.

CloudFridge beschäftigt sich mit Sensoren zur Erfassung dieser Betriebszustände. Neben den bereits angeführten Möglichkeiten zur Nutzung von Kältekreisläufen als Energiespeicher, ermöglichen Sensoren durch optimierte Steuerung von Betriebszuständen zusätzliche Verbesserungen der Wirkungsgrade der Geräte, was aufgrund der enormen Anzahl an Geräten ein beträchtliches Einsparungspotenzial pro Jahr darstellt.

Das modulare Sensorkonzept sieht neben Temperatur-, Druck- und Vibrationssensoren auch Sensoren zur Aneisungserkennung vor. Letztere ermöglichen, dass Enteisungszyklen optimiert gesteuert werden können, wodurch sich ein zusätzliches, beträchtliches Energieeinsparungspotenzial ergibt. Die große Herausforderung in diesem Bereich ist die enorme Kostensensitivität bei derartigen Kältekreisläufen für den Massenmarkt. Trotz der aktuellen EU-Kennzeichnungsverordnung für neue Geräte, stellen die Anschaffungskosten weiterhin einen wesentlichen Faktor in der Kaufentscheidung der Konsumenten dar. Somit müssen die Kosten für einzelne Sensoren inklusive der Montage und Anbindung in der Größenordnung von deutlich unter zehn Euro liegen. Bei drahtgebundenen Sensoren wären bereits die Kosten für Kabel, Kabeldurchführungen (durch Isolation) und Kabelverbindungen derart hoch, dass die Anforderungen nur durch drahtlose Sensoren erfüllt werden können. Zudem erfordern viele Einbausituationen oftmals miniaturisierte Sensoren. Um bei drahtlosen Sensoren einen wartungsfreien Betrieb zu ermöglichen, ist es zudem erforderlich, dass wenn die Energieversorgung der Sensoren autark mittels Energy Harvesting erfolgen kann.

Speziell Druck und Temperaturmessungen sind nur innerhalb des Kompressorgehäuses sinnvoll möglich, gleichzeitig verhindert die normative und sicherheitstechnische Situation die zusätzliche Durchführung von Messleitungen. Daher ist eine energieautarke Lösung zwingend erforderlich. Energy Harvesting Systeme

wie z.B. Solar, Pyroelektrisch oder HF basierend eignen sich aufgrund der fehlenden elektromagnetischen Durchlässigkeit bzw. zu geringer Temperaturunterschiede nicht. Batteriebetriebene Lösungen haben den Nachteil der begrenzten Lebensdauer und treffen nicht den Zeitgeist nach einer nachhaltigen Lebensweise. Damit kommen Systeme in Frage, welche die mechanische Vibrationsenergie des Kompressors nutzen können. Grundsätzlich können Piezoelektrische und induktive Systeme eingesetzt werden, wobei das piezoelektrische Element auch als Sensor verwendet werden kann und tendenziell einen günstigeren Formfaktor für die Applikation aufweist.

CloudFridge hat daher zum Ziel, ein modulares Konzept für die in Kältekreisläufe integrierbare Sensoren zu erarbeiten und die sich daraus ergebenden Energieeinsparungspotenziale und Möglichkeiten zum Ausgleich von Erzeugungs- und Lastspitzen genau zu bestimmen. Daraus werden für Hersteller sowie Endkunden neben der Reduktion an CO₂ Produktion und Energieeinsparung auch neuartige Geschäftsmodelle ermöglicht, die einen zusätzlichen wirtschaftlichen Vorteil und Anreiz bieten können, um eine rasche breite Anwendung der Technologie zu unterstützen.

3 Inhaltliche Darstellung

Die Umsetzung des Projekts CloudFridge erforderte Arbeiten an mehreren Komponenten in dem System. Für die Bereitstellung der erforderlichen Energie für die drahtlosen Sensoren sind „Energy Harvester“ erforderlich. Deren Umsetzung ist in Abschnitt 3.1 beschrieben. Für die Aufnahme der Sensorsignale, deren Aufbereitung und drahtlose Übermittlung sowie zur Umwandlung und Speicherung der elektrischen Energie, die vom Energy Harvester bereitgestellt wird, sind energieeffiziente elektronische Schaltungen und Methoden erforderlich, die sich idealerweise in einem integrierten Halbleiterbauteil kostengünstig umsetzen lassen. Dieses Thema ist im Abschnitt 3.2. adressiert. Die Integration der Komponenten in den Kompressor ist in Abschnitt 3.3. ausgeführt. Die Abschnitte 3.4 und 3.5. beschäftigen sich mit der Energieoptimierung des Gesamtsystems und den entsprechenden Validierungen.

3.1 Piezoelektrischer Generator für Energy Harvesting

Speziell im Inneren von Kühlkompressoren ist die Energieversorgung der notwendigen Sensoren eine Herausforderung. Kabeldurchführungen durch das verschweißte und abgedichtete Gehäuse sind herstellerseitig unerwünscht, da sie für den zu erwartenden Nutzen zu kostenintensiv sind. Mit Batterien kann die Energieversorgung nicht über die zu erwartende Lebenszeit gewährleistet werden und andere Energy-Harvesting Varianten wie photoelektrisch oder thermoelektrisch kommen aufgrund mangelnder Verfügbarkeit an den benötigten Stellen nicht in Frage. Daher bestand das Ziel dieses AP darin, ein piezoelektrisches Energy-Harvesting Modul zu entwerfen und umzusetzen, um die für die Sensorik und Datenübertragung benötigte Energie aus den vom Kompressor verursachten Vibrationen oder Druckschwankungen zu gewinnen. Generell wurden 2 verschiedene Einbaukonzepte auf ihre Umsetzbarkeit und der zu erwartende elektrische Leistung untersucht:

- Konzept 1: außenliegend am Kompressor

- Konzept 2: innenliegend im Kompressor

Final umgesetzt wurde jedoch nur Konzept 2.

Konzept 1: Außenliegende Variante

In der ersten Projektphase wurden unterschiedliche Einbaupositionen und Varianten für beide Konzepte untersucht und auf deren Umsetzbarkeit und zu erwartender Energie hin überprüft. In Abbildung 1 sind die in Erwägung gezogenen Varianten schematisch dargestellt. Um die einzelnen Konzepte zu bewerten, wurden Energie- bzw. Leistungsabschätzungen durchgeführt.

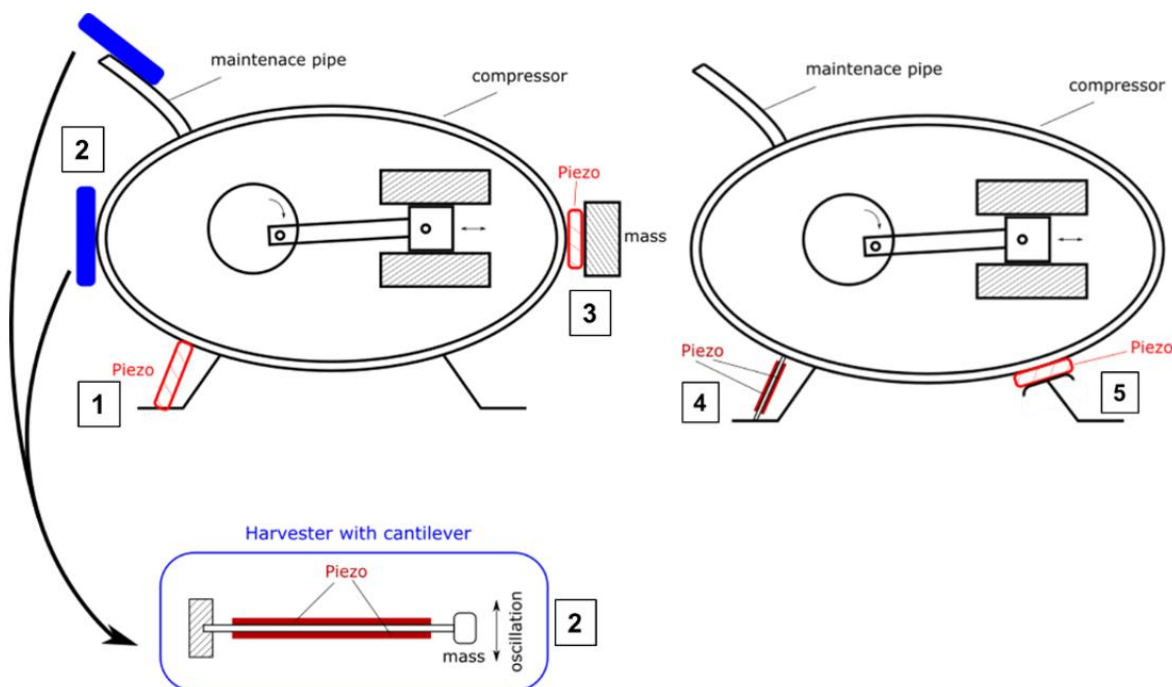


Abbildung 1: Potentielle Einbauvarianten

Neben der zu erwarteten Leistung spielen auch die Kosten eine entscheidende Rolle, wobei Keramikvolumen und benötigte enge Fertigungstoleranzen die größten Kostentreiber darstellen. Auf Basis dieser Abschätzungen wurde eine Kombination aus Variante 4 und 5 als Zielvariante für das außenliegende Konzept festgelegt. Eine entsprechende Skizze ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Harvesting Element besteht aus einer Piezoscheibe, die auf einen kreisförmigen Metallträger geklebt und zwischen Grundplatte und Standfuß eingebaut wird. Um die mechanischen Spannungen im Piezo möglichst homogen zu verteilen, wird die Kraft vom Standfuß über einen Ring mit zu definierendem Durchmesser (innerer Ring) auf den Piezo übertragen. Der Metallträger wird auf einem weiteren Ring (äußerer Ring) gelagert, sodass sich das gesamte Element entsprechend durchbiegen kann. Der äußere Ring wird durch eine Vertiefung in der Grundplatte ersetzt.

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

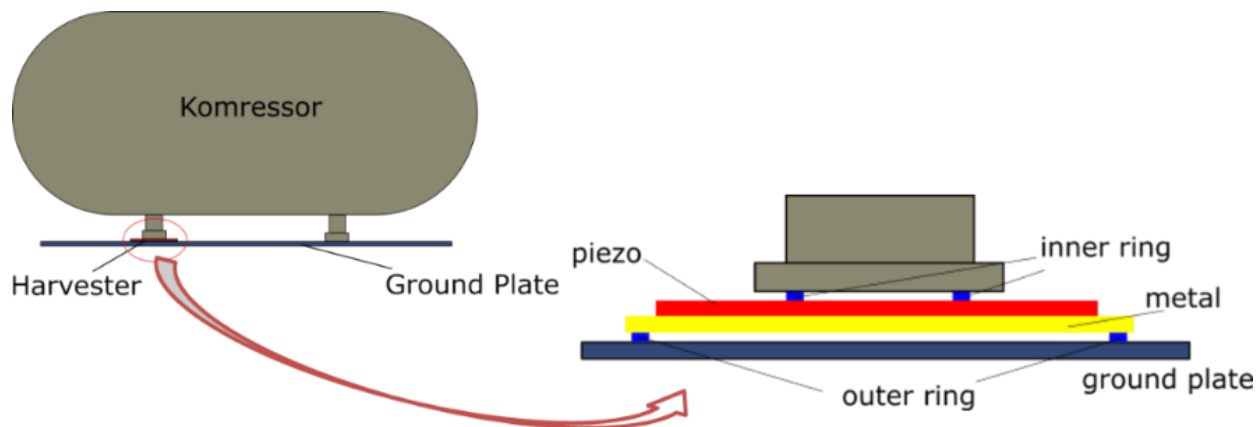


Abbildung 2: Konzept für ersten Prototyp

Zur Optimierung der Harvesting Komponente wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der folgende Parameter variiert wurden:

- Dickenkombination Keramik/Messing
- Durchmesser Keramik/Messing
- Durchmesser Verhältnis innerer zu äußerem Ring

Das Ergebnis dieser Versuchsreihe ist in Abbildung 3 dargestellt. Es sind die erzielten Leistungswerte in Abhängigkeit der zu variierenden Parameter zu sehen. Die maximale Leistung in diesem Setup wurde mit einer Harvesting Komponente mit folgenden Parametern erreicht: $\varnothing = 25\text{mm}$; $\varnothing$ innerer Ring = 11,25mm; Dicke Messing = 300 μm ; Dicke Keramik = 247 μm (rote Markierung in Abbildung 3).

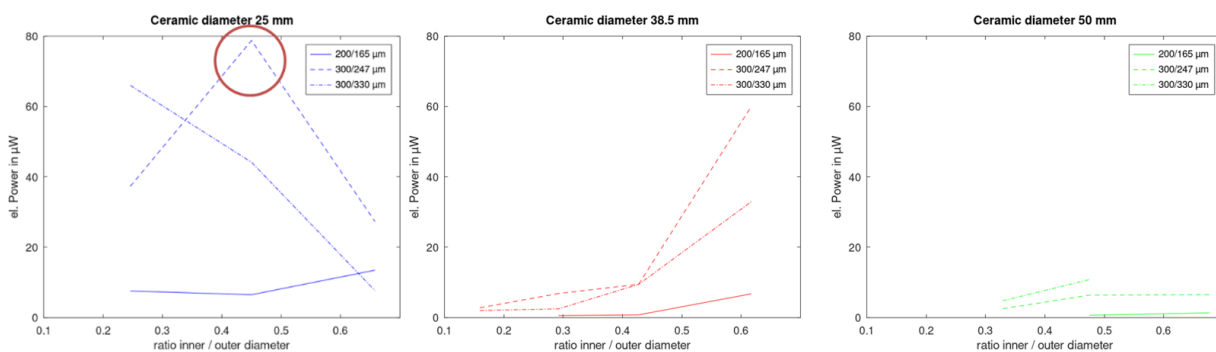


Abbildung 3 Harvesting Leistung in Abhängigkeit der zu variierenden Parameter an der äußersten möglichen Einbauposition

Abbildung 4 zeigt den kompletten Aufbau des Harvester-Prototyps für die außenliegende Anwendung. Der Kompressor wird über den inneren Ring und ein Zwischenstück zur Höhenanpassung auf dem Harvester positioniert. Der resultierende Spannungsverlauf wird an einem impedanzangepassten Lastwiderstand von $\sim 100\text{k}\Omega$ (je nach Kapazität des Moduls) gemessen. Etwaige Verluste an der Konversionselektronik werden mit diesem Messaufbau nicht erfasst.

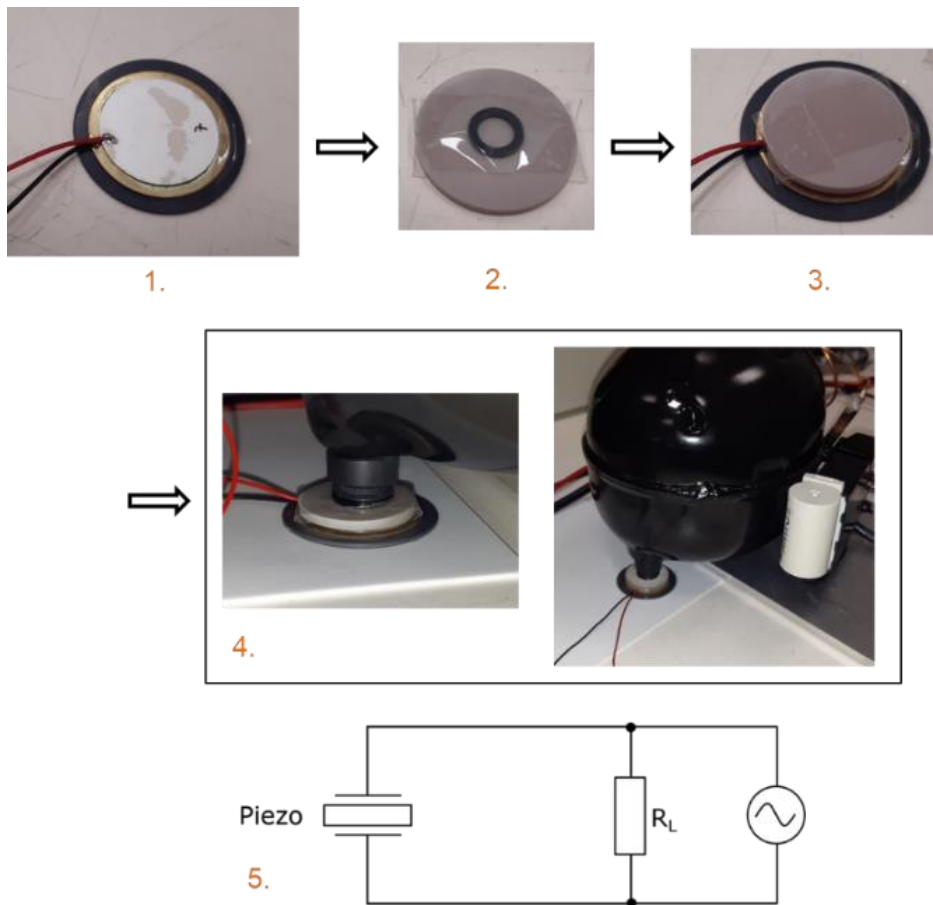


Abbildung 4: Messaufbau mit Messschaltung

Es konnte ein klares Optimum identifiziert werden, mit deren Geometrie weitergearbeitet werden kann. Die erzielte Maximalleistung liegt in etwa in der Größenordnung der ersten Abschätzungen, und auch ein Betrieb der zu betreibenden Elektronik scheint aus Sicht der Konsortialpartner realistisch.

Konzept 2: In den Kompressor eingebaute Variante (innenliegend)

Aufgrund der zunehmenden Verwendung drehzahl geregelter (invertergesteuerter) Kompressoren, insbesondere bei Neuentwicklungen, wurde der Fokus von der außenliegenden Harvestervariante im Projektverlauf mehr und mehr auf die innenliegende Variante verschoben. Für diese Variante sollen statt der Vibrationen im außenliegenden Konzept Druckschwankungen ausgenutzt werden. Verhältnismäßig große Druckschwankungen treten niederdruckseitig an der Ansaugstelle des Kompressors und hochdruckseitig am Kompressor-Auslass auf. Auf beiden Seiten sitzt ein sog. „Muffler“ der einzig und allein der Geräuschunterdrückung dient. In diesen Muffler soll eine zusätzliche Wand eingebaut werden, in der auch das Harvesting Element, wiederum bestehend aus Messing- und Piezoscheibe, sitzt. Diese Wand trennt den Muffler in 2 Kammern. In der dem Kompressor zugewandten Kammer wirken sich die Druckschwankungen aus, wohingegen in der abgewandten Kammer ein weitgehend konstanter Druck herrscht. Durch die Druckdifferenz zwischen den beiden Kammern wird das Harvesting Element periodisch verformt. Die Wand soll möglichst nahe am Kompressor Ein- bzw. Auslass liegen, um die Druckschwankungen möglichst direkt nutzen zu können. Der große Vorteil besteht darin, dass in dieser

Einbausituation kein Isostatischer Druck auf den Harvester wirkt (die Mittelwerte in beiden Kammern sind weitestgehend gleich). Prinzipiell würde dieses Konzept auf Druck und Saugseite funktionieren, aufgrund der einfacheren Einbausituation steht zurzeit die Saugseite im Fokus. In Abbildung 5 ist eine Konstruktionsskizze für einen solchen modifizierten Muffler zu sehen.

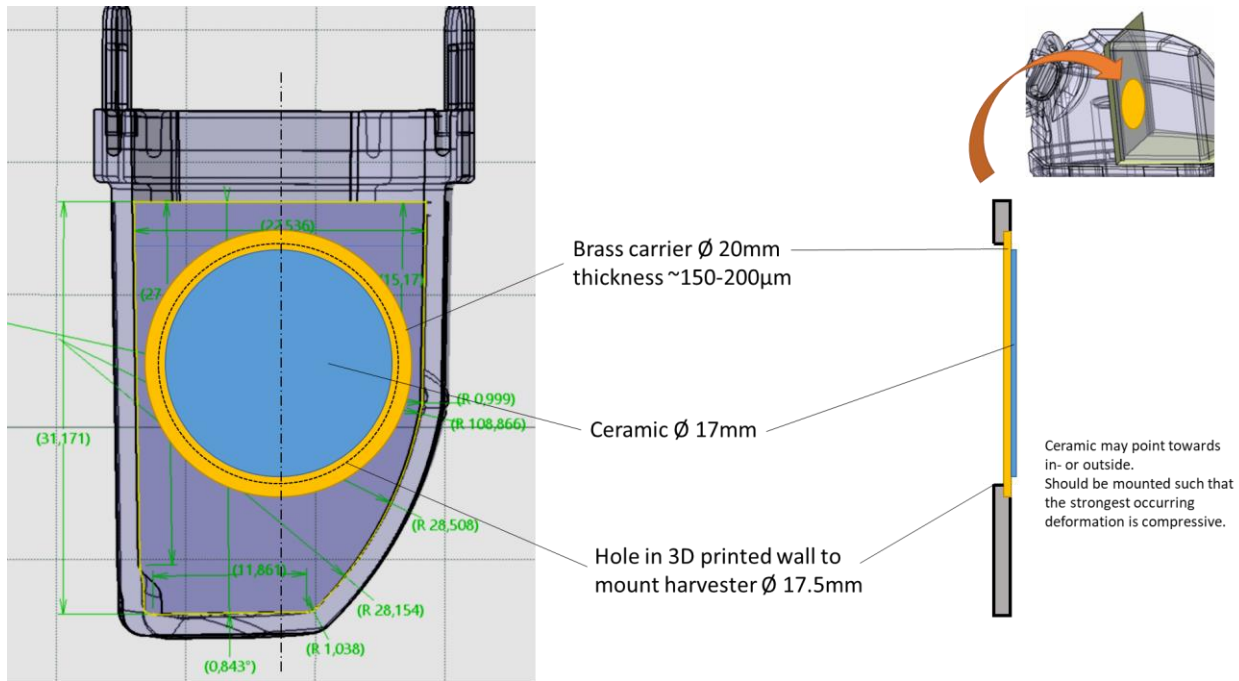


Abbildung 5: Skizze Einbaukonzept „Kompressor Innen“

Die modifizierten Muffler, mit Trennwand und Ausnehmung für den Harvester, wurden mittels 3D-Druckverfahren von den Konsortialpartnern Nidec und SES-Tec hergestellt und der Harvester in die dafür vorgesehene Ausnehmung geklebt. Der Harvester wurde an die vom Konsortialpartner Eologix zur Verfügung gestellten Schaltung mit integriertem Funkmodul angeschlossen, um die Daten nach außen zu übertragen. Die Elektronik wurde im Inneren des Mufflers untergebracht. Es wurden mehrere Muffler vorbereitet und diese wurden entsprechend an der Ansaugstelle in den Kompressoren montiert. Abbildung 6 zeigt die Druckdifferenzen zwischen den beiden Kammern im Muffler während einer Kompressor Umdrehung.

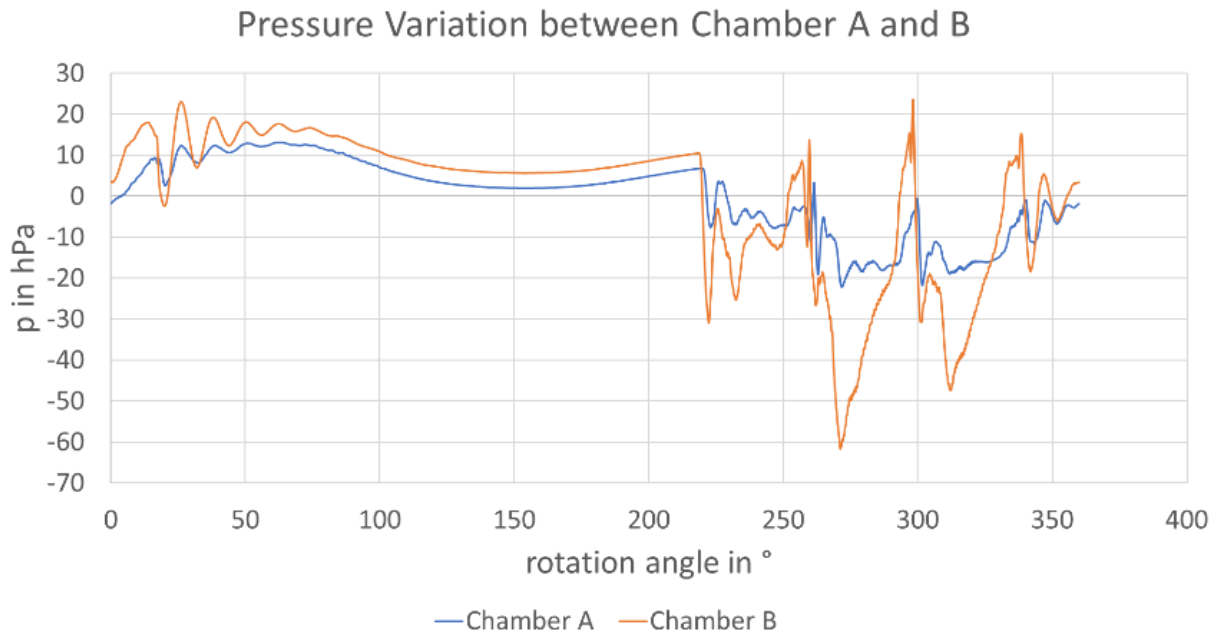


Abbildung 6: Druckdifferenzen zwischen den beiden Kammern im Muffler

In Abbildung 7 ist der finale Prototyp für die innenliegende Variante zu sehen. Neben dem Piezo Harvester besteht der Prototyp aus einer Harvester Elektronik Schaltung, Temperatur- und Beschleunigungssensoren sowie eines BLE-Moduls bzw. eines Sub-GHz-Interfaces zur Datenübertragung kombiniert auf einer Platine. Die Elektronik ist auf extremste Energieeffizienz getrimmt, sodass ein Mess- und Sendevorgang pro 30s mit der vom Harvester generierten Energie ausgeführt werden kann.



Abbildung 7: Druckdifferenzen zwischen den beiden Kammern im Muffler

In Tabelle 1 sind die RMS Spannung und die Ausgangsleistung am Harvester in Abhängigkeit der Drehzahl angeführt und liegt in etwa im Bereich von 3 – 100µW an einem 1kΩ Lastwiderstand.

Table 1: RMS-Spannung und Ausgangsleistung des Harvesters an einem 1kOhm Lastwiderstand in Abhängigkeit der Kompressordrehzahl.

Frequency in Hz	U_rms in mV	P_out in µW
50	58	3.4
75	150	22.5
100	297	88.2
125	327	107.2

3.2 Halbleiterintegration für energieautarke Sensorsysteme

Die Arbeiten an den Halbleiterkomponenten wurden basierend auf einer ersten vorhandenen Chip Version gestartet. Mittels eines Chip-Evaluierungsboards (siehe Abbildung 8) wurden für die einzelnen applikativen Teilaufgaben FW-Routinen entwickelt. Diese umfassen

- Übergänge zwischen Idle/deep-sleep und Aktiv-Mode entsprechend der Harvesting-Rahmenbedingungen:
Autonomes Aufwachen bei Überschreitung einer bestimmten konfigurierbaren Eingangsspannung
Koordinierter Übergang in den deep-sleep Modus am Ende des Zyklus oder definierter Einsatz eines HW-Resets bei Unterschreitung der Versorgungsspannung am Ladekondensator ("Brown-out" Detektion)
- Eindesignen eines Druckmessbausteins mit 433MHz Funk
- Messroutinen zur Acquisition von Temperatur- und Druckwerten
- MAC Layer Programmierung für sichere 433MHz Funkübertragung (unterstützt durch NFC basiertes pairing; effiziente Data-encryption möglich durch Chip-internes HW-Krypto-Einheit)
- Ablaufsteuerung/Interruptkonzept

und wurden sukzessive zu einem vollständigen Lastzyklus zur Messung und Kommunikation von Parametern im Kompressorinneren zusammenintegriert.

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

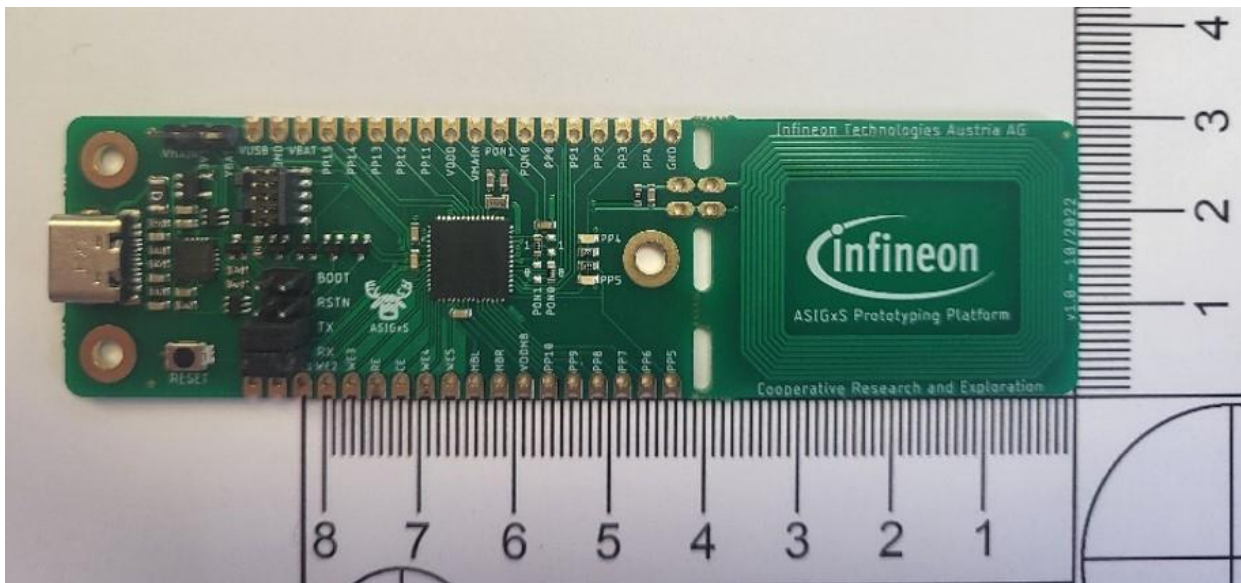


Abbildung 8: Evaluierungsboard

Besonderes Augenmerk wurde auf Power-Profiling zur Optimierung des Leistungs- und Energieverbrauchs gelegt. Nach Optimierung betrug die Dauer eines vollständigen Zyklus ca. 40ms und der Energieverbrauch entsprechend Abbildung 9 nur ca. 120 μ C (ca. 300 μ J), sodass kleine Ladekapazitäten auf der Harvesterseite eingesetzt werden können – mit Reserve wurden 300 μ F verwendet, was einen Spannungshub bei Entladung von ca. 0,5V ergibt. Die Schaltung wurde auch erfolgreich mit 150 μ F Kapazität getestet, was zu einem höheren Spannungshub mit weniger Reserve führt.

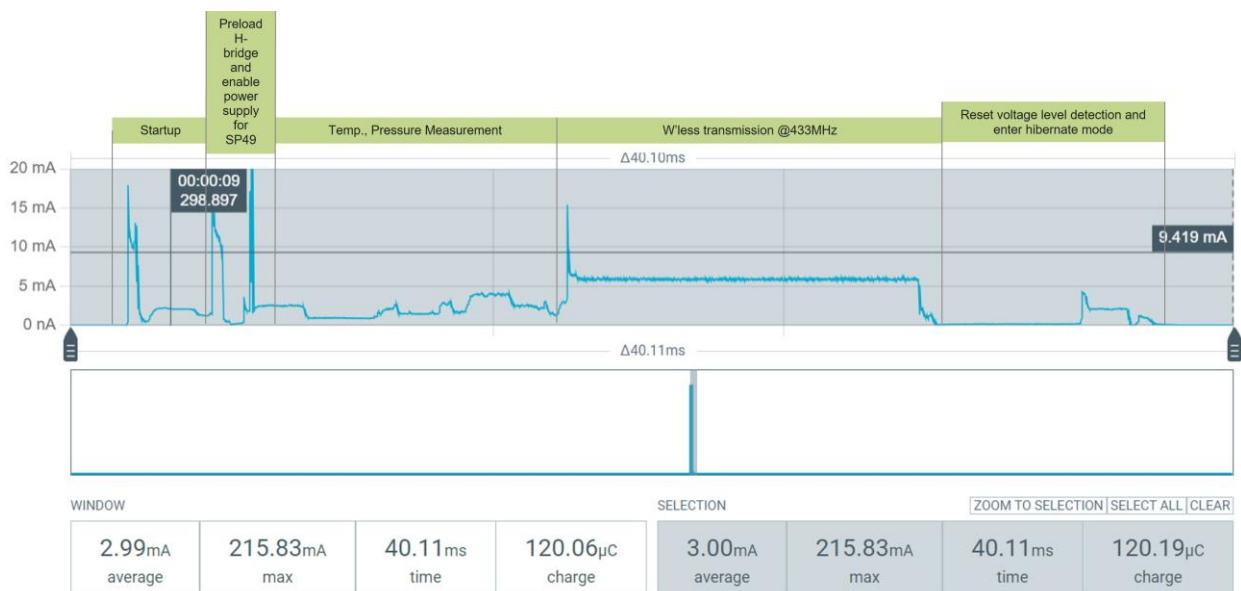


Abbildung 9: Stromprofil mit einzelnen Phasen

Damit konnte ein energieautarkes Sensorsystem zur Parametererfassung im Kühlkreislauf geschaffen werden.

Als zweiter Arbeitspunkt stand die Weiterentwicklung der konzipierten 2. Chip Version im Mittelpunkt, die als zentrale Verbesserung einen schnell einzuschaltenden A/D Konverter vorsah, mit dem ein erweitertes

Energiemanagement unter Einbeziehung und Messung der unterschiedlichen Spannungsdomains und Chip-internen Stromflüsse realisierbar wird. Hinzu kommen Schaltungen zur Steigerung der Energieeffizienz im Harvesterbetrieb. Hierfür wurden alle Designschritte des Schaltungsdesigns und Test für die neuen Blöcke durchgeführt.

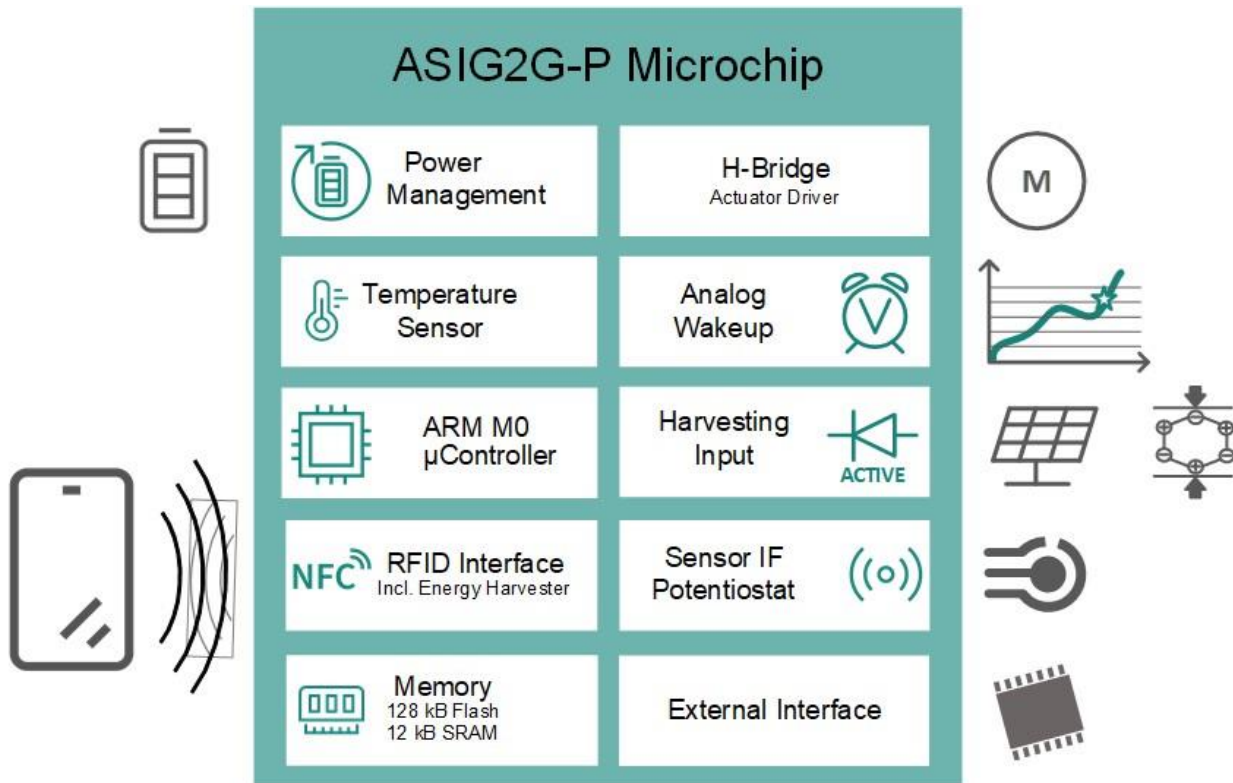


Abbildung 10: Blockdiagramm des Mikrochips mit verbesserten Energie-Harvesting Eigenschaften

Der Chip gestattet Energiezustandserfassungen für fortschrittlichere Szenarien um intervalbasierte kontinuierliche Parametermessungen energieautark und angepasst an die jeweilige energetische Situation effizienter durchzuführen.

In Erweiterung des ursprünglich angedachten Konzepts wurden die Sensorknoten nicht außerhalb am Kompressor sondern innerhalb des Kompressors im sogenannten Muffler montiert. Das bietet einen wesentlichen Vorteil: Anstelle die unerwünschte (und daher möglichst gering zu haltende) Vibration des Kompressors für Harvesting zu nutzen, werden Druckschwankungen im Inneren des Kompressors ausgenutzt. Diese sind eine unmittelbare Konsequenz der Grundfunktion des Kompressors und daher stets vorhanden. Daher lassen sich wesentlich größere elektrische Leistungen erzielen. Auch konnte zudem gezeigt werden, dass die drahtlose Kommunikation aus dem inneren des Kompressors durch die Durchführungen z.B. für die elektrische Versorgung des Kompressors, sehr zuverlässig funktioniert.

Der große Vorteil des CloudFridge Sensor Konzepts ist, dass der Sensor in den Bauteil "Muffler" integriert werden kann und keine Verbindung mit der elektischen Versorgung oder Kommunikationsleitungen braucht. Dadurch lässt sich das System sehr kostengünstig herstellen und ist für unterschiedlichste Kompressoren ohne die Erfordernis von Modifikationen integrierbar.

Hinsichtlich der drahtlosen Sensorik wurden Methoden zur Reduzierung des Energiebedarfs untersucht. Dabei zeigte sich, dass unerwünschte Vibrationen und akustische Emissionen im Frequenzbereich von mehreren hundert Hertz bis in den Kilohertzbereich auftreten können. Klassische Ansätze würden

Abtastraten im Kilohertzbereich erfordern, für deren Bereitstellung das Harvesting-Konzept nicht ausreichend ist.

Daher wurde der Ansatz des Compressive Sensing unter Berücksichtigung der analogen Domäne untersucht. Compressive Sensing nutzt aus, dass Signale oft nur wenige Frequenzkomponenten beinhalten – eine Eigenschaft, die als „sparse“ bezeichnet wird. Dies ermöglicht es, das Signal mit Abtastraten unterhalb der Nyquist-Rate vollständig zu rekonstruieren. Dadurch kann die zu übertragende Datenmenge deutlich reduziert werden. Die meisten Compressive Sensing-Konzepte tasten jedoch weiterhin mit voller Rate ab und reduzieren die Datenmenge erst in der digitalen Domäne.

Unser Ansatz verfolgt die Kompression bereits in der analogen Domäne, d.h. es werden nur die für die Übertragung notwendigen Abtastwerte erfasst. Dies ermöglicht eine weitere Reduzierung des Energieverbrauchs.

Es wurde auch gezeigt, dass die Reduktion der Datenmenge nicht nur den Energieverbrauch senkt, sondern auch die Zuverlässigkeit des Systems erhöht. Durch die geringere Auslastung des Kommunikationskanals gehen weniger Pakete verloren, was die Signalrekonstruktion verbessert.

Weitere Untersuchungen betreffen die kapazitive Erkennung von Vereisung in einem Gefriergerät. Wesentlich ist, dass die Sensorik den Zeitpunkt erkennen kann, zu dem das Eis geschmolzen ist und die Beheizung beendet werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass dies sowohl mit Temperatursensoren als auch mit kapazitiven Sensoren möglich ist.

3.3 Sensor System Integration

Im Arbeitspaket "Sensor System Integration" wurden entsprechend der Projektplanung weiter an der Miniaturisierung und Integration der Systemkomponenten gearbeitet.

Im Anschluss an einen Produktionsversuch (Einbettung und Einschweißen in serienäquivalenten Kompressor Ende 2023) wurde eine ausführliche Analyse von Eigenschaften und Grenzen des Systems durchgeführt, nachfolgend wurden Bauraum und Formfaktor optimiert.

Weiters wurde die Harvestingschaltung weiter optimiert und analysiert und mit dem Hersteller an der Schaltung gearbeitet, um im Bereich des Energy Harvesting die Quelle und den Chip so gut wie möglich aufeinander abzustimmen. Für die Kapselung der Platine gegenüber Ölen und Kältemitteln wurde auf selbst entwickelte und gefertigte Vergussgehäuse zurückgegriffen. Durch Rapid Prototyping-Methoden konnte auch hier effizient gearbeitet werden.

Zur Ermittlung der tatsächlich verfügbaren Leistung aus dem Harvesting im Ansaugschalldämpfer wurde ein einfacher Laboraufbau basierend auf einem geöffneten Kompressor und Membranlautsprechern aufgebaut. Mit diesem Aufbau konnten analog die gemessenen Leistungen bei unterschiedlichen dynamischen Drücken und unterschiedlichen Frequenzen ermittelt werden. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Spannungsmessung am Piezo-Harvester (offen) bei 50 Hz.

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

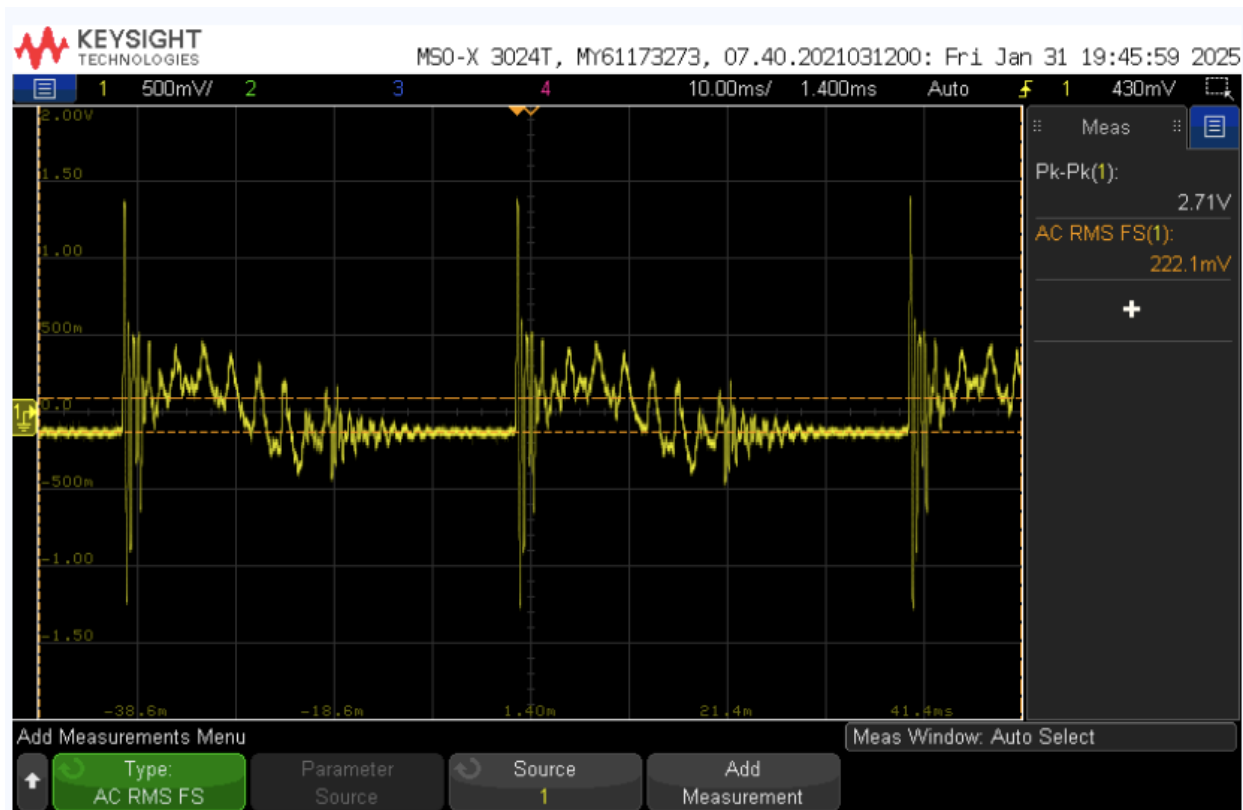


Abbildung 11: Leerlaufspannung bei 50Hz

Abbildung 12 zeigt das Ergebnis unter realer Belastung bei der doppelten Drehzahl. Es können ca. 300 μ W aus dem Harvester gewonnen werden.

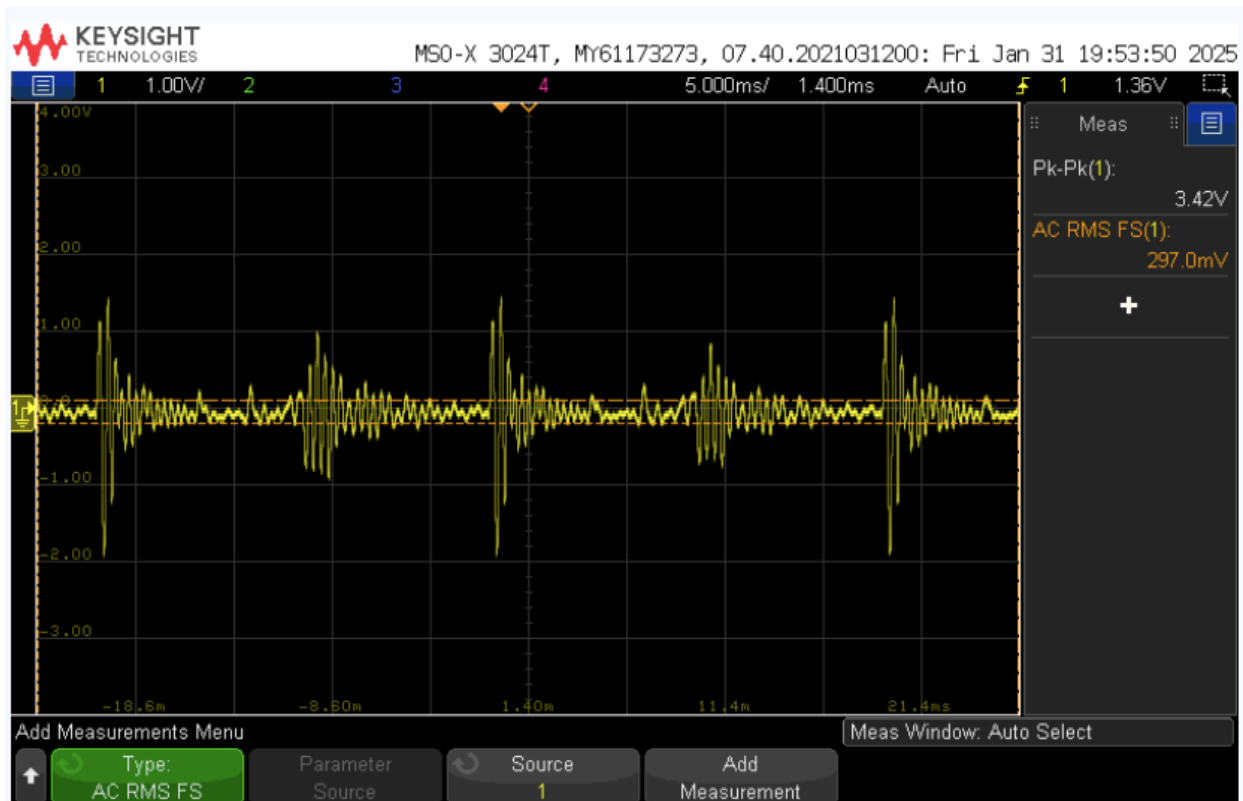


Abbildung 12: Belasteter Harvester bei 100Hz

Die zuverlässige Übertragung von Sub-GHz-Signalen durch ein verschweißtes Gehäuse stellt naturgemäß eine technische Herausforderung dar. Zunächst wurde seitens der Sensorplatine optimiert. Dazu wurde der miniaturisierte Funkpfad detailliert analysiert, Verbesserungsvorschläge abgeleitet und in eine revidierte Version der Platine eingearbeitet, um eine sichere Funkverbindung mit gleichzeitig so wenig Energiebedarf wie nötig zu gewährleisten.

Nachfolgend wurde eine neue Platine entwickelt, hergestellt und in Betrieb genommen. Durch die implementierte Integration von zwei kompletten Funkpfaden auf einer Baugruppe bzw. Platine wurde auch eine Redundanz für langfristig stabilen Betrieb hergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Qualität und Performance der Funkstrecke maßgeblich verbessert wurde (etwa 10dB besseres Linkbudget). Die Empfangsplatine kann flexibel versorgt werden (CAN, USB, DC) und ist somit geeignet für eine Integration in die Kompressorsteuerung oder den Inverter.

Beide Teilsysteme (Sensorplatine und Empfängerplatine) wurden einem CE-Precompliance-Test unterzogen. Dabei wurde u.a. sowohl die Immunität der Komponenten gegenüber externen Störern die Emission von Störfeldern durch den eigenen Betrieb überprüft. Es konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Komponenten ohne wesentliche weitere konzeptuelle Modifikationen einer Kommerzialisierung zugeführt werden könnten.

Ein weiterer Sensoraufbau wurde mit dem Infineon Chipset durchgeführt. Basierend auf den Arbeiten aus AP3 wurde ein weiterer Integrationsschritt durchgeführt und in einem von Nidec zur Verfügung gestellten Kompressor mit der TDK-Piezoscheibe als Harvester betrieben. Die folgende Abbildung 13 zeigt das im Muffler integrierte Modul mit einer Größe von 40x15mm.

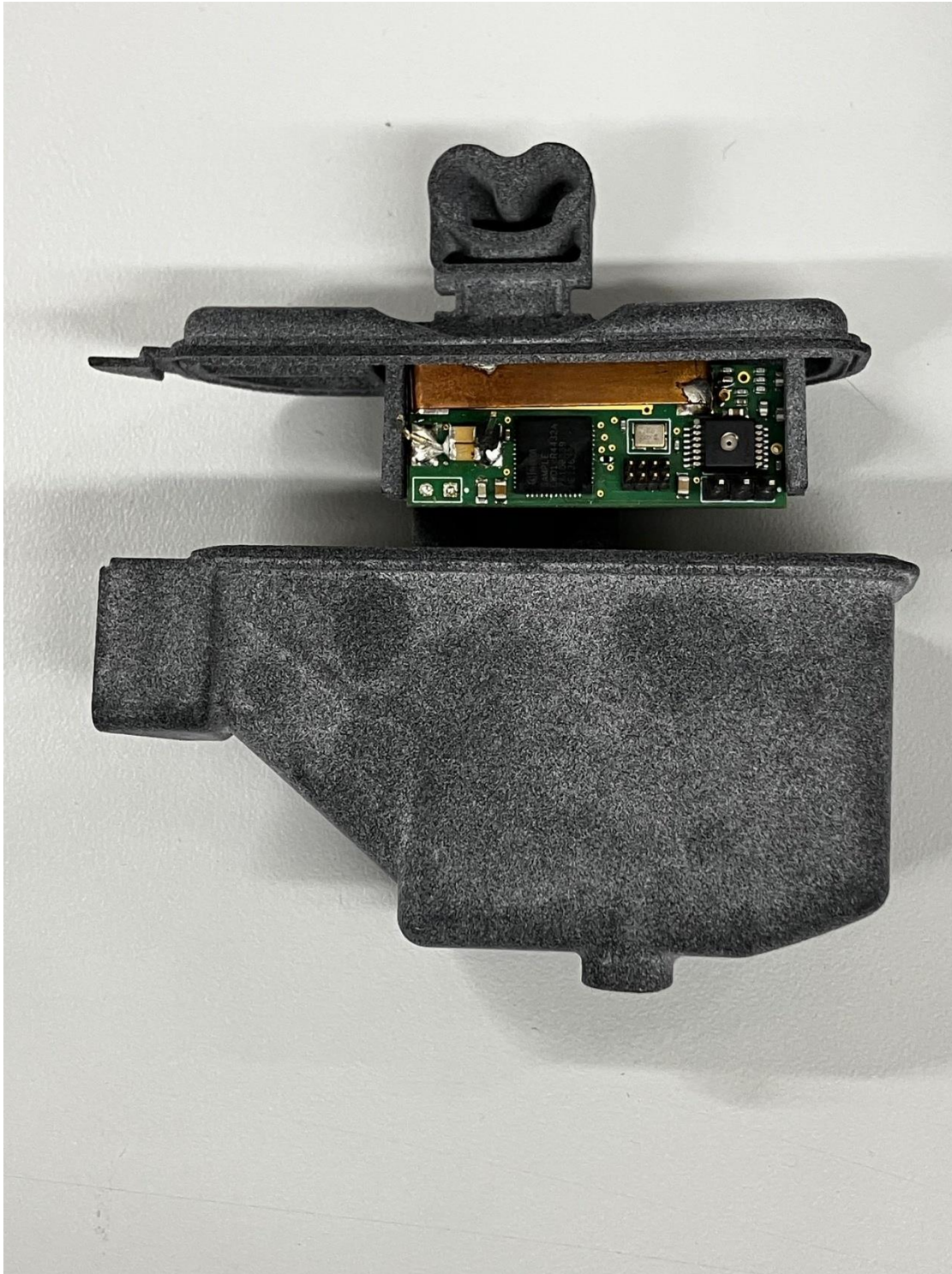


Abbildung 13: Im Muffler integriertes Harvesting Modul mit Druck- und Temperaturmessung und drahtloser Übertragung bei 433MHz

Hiermit konnte gezeigt werden, dass mit einem 300 μ F Kondensator als Energiespeicher vom Piezo Harvester innerhalb von ca. 28s genügend Energie erzeugt werden konnte, um einen Temperatur- und Druckmesszyklus durchzuführen um die Daten im Anschluss drahtlos bei 433MHz über Funk nach außerhalb des Kompressors zu übertragen. Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen dies:

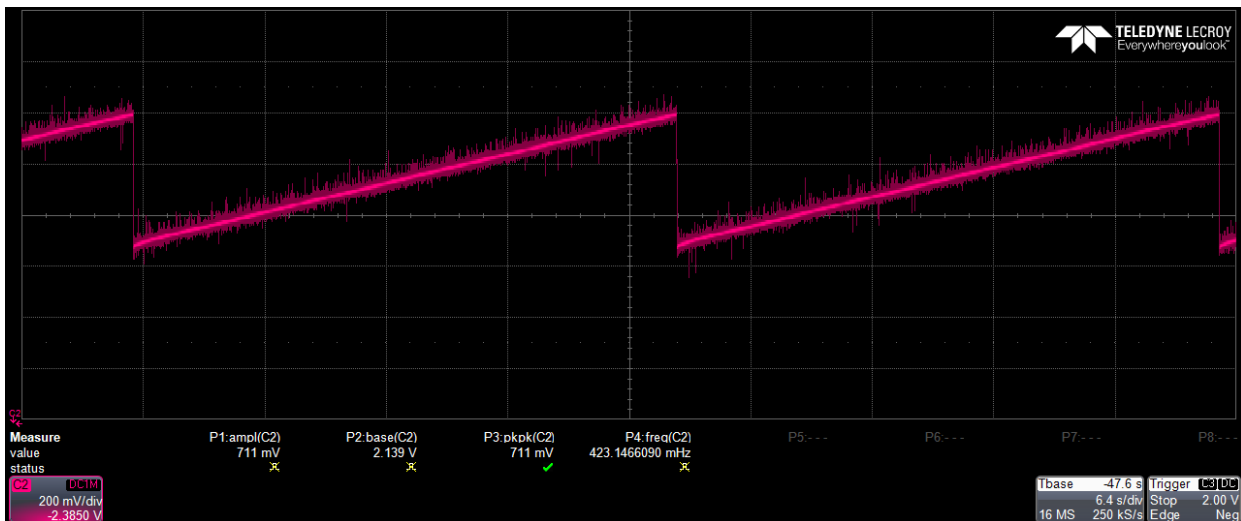


Abbildung 14: Periodische Ladezyklen bei 125 kHz Kompressorfrequenz

Hier ist der zeitliche Verlauf der periodischen Ladezyklen bei 125kHz Kompressordrehzahl mit jeweils dazwischenliegenden Entladezyklen (siehe nächsten Punkt) zu sehen.

Diese Abbildung zeigt den zeitlichen Stromverlauf eines vollständigen Entladezyklus (selbstständiges Aufwachen sobald Schwellspannung von ca. 3V erreicht wird, Drucksensorbaustein einschalten, Druck-Temperaturmessung durchführen, drahtlose Datenübertragung bei 433MHz, ausschalten) wie er im AP3 implementiert wurde; dank Power-Profiling der implementierten FW konnte ein extrem niedriger Energieverbrauch von ca. 360 uJ (ca. 120 uC) für einen gesamten Zyklus erreicht werden. Bemerkenswert ist auch der sehr kleine Idle-Stromverbrauch des Harvesting-Chips von ca. 250 nA während des Spannungsanstiegs bis die Schwellenspannung erreicht wird

In der fortgeschrittenen Energiemanagement Variante kann durch den Einsatz von Supercaps mehr Energie gesammelt werden und für die regelmäßige Messung und Übertragung von zeitlich höher abgetasteten Druck- und Temperaturdaten für einen gesamten Kompressorzyklus unter Einsatz des Energieflussmanagements verwendet werden, die in Echtzeit außerhalb des Kompressors zur Kühlgerät-Energieoptimierung weiter prozessiert werden können. Die Häufigkeit der Messzyklen skaliert dabei mit der Inverterfrequenz des Kompressors:

In Ergänzung zu den weiter oben beschriebenen CE-Precompliance-Tests wurden auch erste Zuverlässigkeitsuntersuchungen in Form von Medienkompatibilitätstests durchgeführt, um zu ermitteln, welchen Einfluss die im Kompressorinneren vorhandenen Substanzen auf die elektronischen Komponenten – primär der Chips mit Drucksensorik - haben. Dazu wurden Infineon Komponenten mit MEMS-Ducksensor in Kompressoröl und in einem Gemisch aus Kompressoröl und Kältemittel R600A untersucht. Der Testablauf kann folgendermaßen skizziert werden:

1) Test in Kompressoröl (durchgeführt bei Infineon)

- Initiale Messung auf Produktionstester
- Stress bei Infineon bei dem Kompressorenöl unter leichtem Druck von 2 bar für 30 Tage den Teilen in einer Druckkammer zugeführt wird
- Finale Messung auf einem Produktionstester, um Abweichungen verursacht durch das Kompressorenöl zu erkennen

2) Test in Kompressoröl + Kältemittel R600a (durchgeführt bei Nidec)

- Initiale Messung auf Produktionstester
- Stress bei Nidec entsprechend den für Kompressoren üblichen Tests (um auch zu überprüfen ob die Komponenten des Drucksensors umgekehrt den Kompressor negativ beeinflussen könnten)
- Finale Messung auf einem Produktionstester um Abweichungen verursacht durch das Kompressoröl oder das Kältemittel R600a zu erkennen

Die Tests waren erfolgreich. Die Abweichungen lagen in einem gültigen Toleranzbereich und auch optisch waren bei den Chips keine Veränderungen erkennbar - siehe nachfolgende Abbildung 15. Nur beim Hochtemperaturtest im Gas lösten sich die 5 im Kompressorinneren platzierten Chips und wurden am Kompressorkolben kaputtgeschliffen (linkes Bild), Deshalb gab es für diesen einen Testfall keine gültigen Ergebnisse.

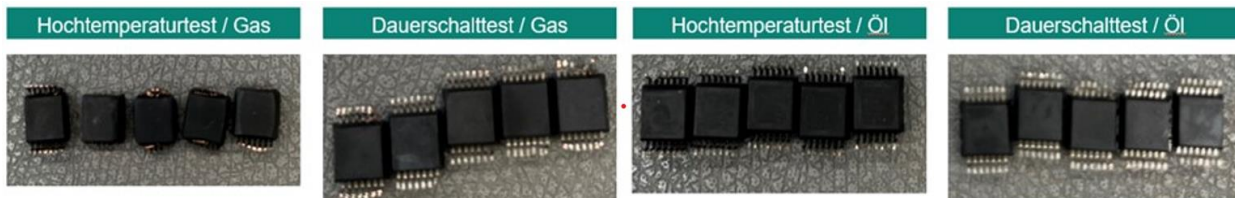


Abbildung 15: Chip-Fotos nach ersten Zuverlässigkeitstests

Insgesamt zeigen die erzielten Ergebnisse, dass die Integration und der Betrieb eines energieautarken drahtlosen Sensorknotens zur drahtlosen Messung von Zustandsgrößen innerhalb des Kühlkompressors zur externen Auswertung und Effizienzsteigerung – z.B. in der Kompressorsteuerungseinheit - möglich ist und auch Funk-regulatorische sowie Zuverlässigkeits-Anforderungen trotz der harschen Verhältnisse im Kompressor inneren für eine nachfolgende Produktivierung erreichbar erscheinen.

3.4 Energie Management und Optimierung

Das Arbeitspaket 6 „Energiemanagement und Optimierung“ wurde planmäßig umgesetzt und wurde wie geplant vollständig abgeschlossen. Im Rahmen dieses Pakets wurden alle wesentlichen Untersuchungen durchgeführt, die zur Validierung und Weiterentwicklung des thermodynamischen Modells des Kühlgeräts erforderlich waren. Sämtliche Ergebnisse wurden in Deliverables dokumentiert und stehen auf dem Projektlaufwerk zur Verfügung.

Ein zentraler Schwerpunkt der Arbeiten war die detaillierte Analyse der Implementierbarkeit von Phase-Change-Materials (PCM) in das Kühlgerät. Durch die weitergehende Validierung der Simulation und die Integration der Abtauzyklen konnte eine noch präzisere Nachbildung des realen thermischen Verhaltens erzielt werden. Die Simulationen lieferten dabei belastbare Daten, die als Grundlage für die Optimierung des Energieverbrauchs und der Systemeffizienz verwendet wurden. Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen Simulation und experimentellen Daten ist nachfolgend ersichtlich.

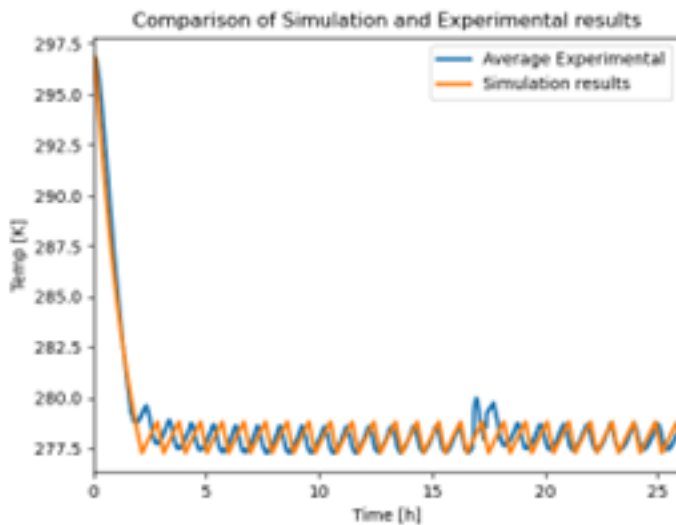


Abbildung 16: Vergleich Simulation vs. Experimenteller Daten

Untersuchung der optimalen Platzierung von PCM-Materialien

Zur Optimierung der thermischen Eigenschaften des Kühlgeräts wurden verschiedene mögliche Positionen für die Platzierung der PCM-Materialien untersucht. Dabei wurden unter anderem die folgenden Positionen theoretisch analysiert:

- Am Verdampfer
- Am Kondensator
- Zwischen Kompressor und Kondensator
- Zwischen Kondensator und Kapillarrohr
- Zwischen Verdampfer und Kompressor

Um die Umsetzbarkeit der einzelnen Varianten zu beurteilen, wurde zunächst ein vereinfachtes Modell verwendet, das die verfügbaren Platzverhältnisse an den jeweiligen Positionen, die maximal erreichbare Energieeinsparung sowie die Eigenschaften geeigneter PCM-Materialien untersuchte. Die Analyse ergab, dass ausschließlich eine Platzierung des PCM an der Innenwand des Kühlgeräts am Verdampfer ein ausreichend hohes Potenzial zur Energieeinsparung bietet. Diese Ergebnisse stimmen mit den in der wissenschaftlichen Literatur verfügbaren Untersuchungen überein.

Auswahl des PCM-Materials

Die Untersuchung verschiedener PCM-Materialien für den Einsatz im Kühlgerät konzentrierte sich auf Stoffe mit einem Phasenwechselbereich zwischen 3 °C und 5 °C, um eine optimale thermische Regelung zu gewährleisten. Folgende Materialien wurden in die Analyse einbezogen:

PCM-Material	Schmelz- bereich (°C)	Wärmespeicher- kapazität (kJ/kg)	Wärmeleit- fähigkeit (W/mK)	Dichte @ 0°C (kg/L)	Spezifische Wärme- kapazität (J/kgK)
ClimSel C7	4 - 8	135	0.78	1.4	-

PureTemp 4	5	187	0.25	0.88	2.26
Rubitherm SP5	2 - 7	155	0.6	1.4	2

Aufgrund ähnlicher thermophysikalischer Eigenschaften wurde das Material Rubitherm SP5 für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Die Entscheidung basierte auf der Qualität und Verfügbarkeit der Messdaten sowie auf der Kompatibilität mit existierenden Modellen.

Simulation der PCM-Integration und Optimierung des Energieverbrauchs

Das PCM-Material wurde über die gesamte Innenrückwand des Kühlgeräts implementiert, wobei die Schichtdicke als variabler Parameter berücksichtigt wurde. Ziel war es, die optimale Masse an PCM zu bestimmen, die den größten Einfluss auf die thermodynamische Stabilität des Systems hat. In nachfolgender Abbildung ist der Einfluss des PCM-Materials auf die Innentemperatur des Kühlgeräts, für eine exemplarische Schichtstärke von 5mm PCM-Material dargestellt. Deutlich ersichtlich, ist die stabilisierende Wirkung des PCM's.

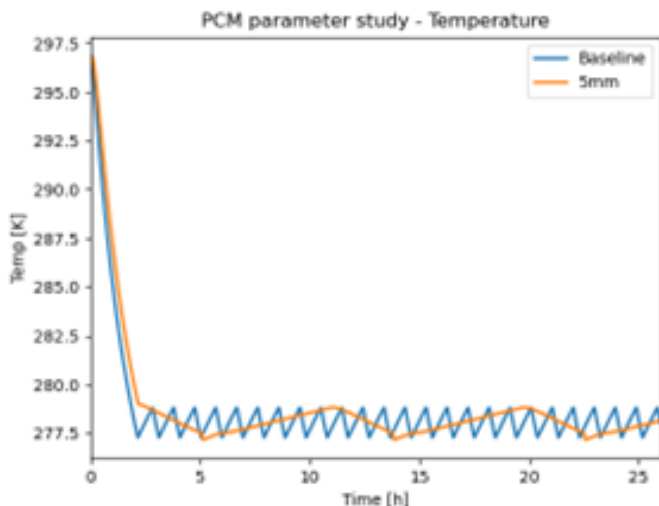


Abbildung 17: Einfluss des PCM auf die Temperatur innerhalb des Kühlgeräts

Die Simulationen ergaben, dass die Platzierung des PCM eine deutliche Reduzierung der Temperaturschwankungen innerhalb des Kühlgeräts bewirkt. Dies hat den positiven Effekt, dass der Kompressor nicht mehr so häufig schaltet, sondern längere Betriebszyklen aufweist. Eine solche Veränderung wirkt sich günstig auf die Systemeffizienz aus, da übermäßige Schaltvorgänge vermieden werden, welche zu einem erhöhten Energieverbrauch führen könnten.

Optimierung der Schichtdicke

Eine Parameterstudie zur PCM-Schichtdicke ergab, dass eine optimale Energieeinsparung im Bereich zwischen 2 mm und 8,5 mm erreicht wird. Je nach Schichtdicke konnten Verbesserungen des Energieverbrauchs zwischen 0,4 % und 11 % festgestellt werden.

- Zu geringe Schichtdicken (<2 mm) hatten kaum einen Einfluss auf die Energieeinsparung.
- Zu große Schichtdicken (>8,5 mm) führten hingegen zu einer Verschlechterung der Gesamtenergieeffizienz.

In nachfolgender Abbildung ist das Ergebnis der Optimierung dargestellt.

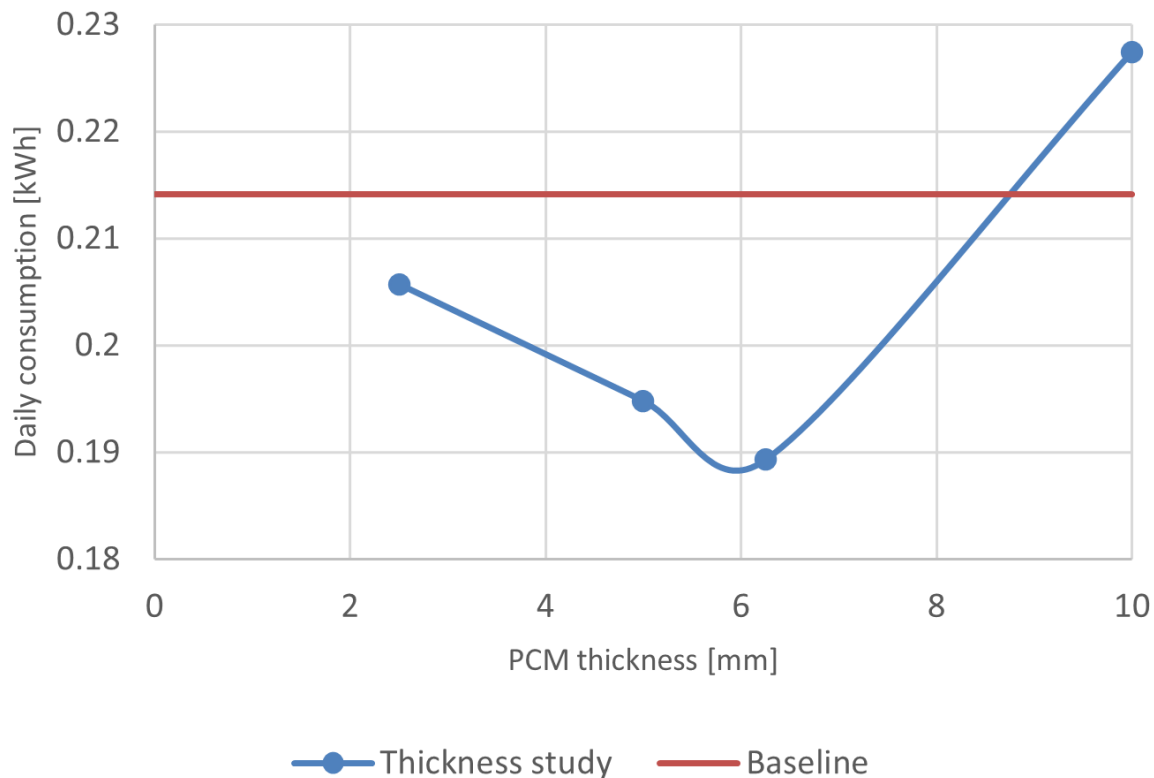


Abbildung 18: Optimierung der PCM Schichtstärke

Zusammenfassend wurden alle wesentlichen Untersuchungen zur PCM-Integration und Regelstrategie vollständig durchgeführt. Die Simulationen zeigen, dass eine gezielte Anpassung der Regelstrategie es ermöglicht, die experimentell ermittelten Vorteile auch in realen Versuchen zu reproduzieren.

Allerdings zeigte sich, dass die zur signifikanten Verbesserung notwendige PCM-Menge aus Packaging-Sicht noch nicht optimal integriert werden kann. Für die Überleitung in eine Serienanwendung wären folgende Schritte noch notwendig:

Die weiterführende Analyse der geometrischen Integration von PCM, um eine praxistaugliche Lösung ohne nachteilige Auswirkungen auf das Kühlgerätedesign zu ermöglichen.

Verfeinerung der Regelstrategien, um Sie an reale Aufstellungssituationen im Haushalt anzupassen, und unter Berücksichtigung neuer Sensordaten aus der realen Implementierung.

3.5 Systemintegration und Validierung

Im Zentrum dieses Arbeitspakets stehen die experimentelle Validierung der entwickelten Systeme (Arbeitspakete 7.2 und 7.3) sowie deren erfolgreiche Integration in die übergeordnete Systemarchitektur. Es werden die durchgeführten Tests, die erhaltenen Ergebnisse sowie die daraus abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen detailliert erläutert. Neben der Integration des Funkmoduls inklusive des

Energy-Harvesters, liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der Evaluierung der Systemperformance unter variierenden Betriebsbedingungen und der Identifikation von Verbesserungspotenzialen.

System Funkmodul mit Energy - Harvester

Dieser Bericht untersucht die Integration eines Energy Harvesting-Systems mit einem Funkmodul zur Reduktion akustischer Emissionen in Verdichtern. Der Fokus liegt auf der Nutzung von Druckschwankungen im Saugschalldämpfer zur Energiegewinnung und der gleichzeitigen Minimierung von Effizienzverlusten.

Zunächst wurden verschiedene Konzepte zur Positionierung des Energy Harvesters analysiert, wobei die Druckpulsationen im Saugschalldämpfer als primäre Energiequelle genutzt wurden. Erste Versuche zeigten, dass eine Platzierung nahe dem Saugventil vielversprechende Ergebnisse lieferte, jedoch Herausforderungen hinsichtlich zusätzlicher Druckverluste und akustischer Emissionen mit sich brachte. In Abbildung 19 sind 2 verschiedene Konzepte dargestellt, ersichtlich sind dabei die veränderten Positionen der Piezo harvester.

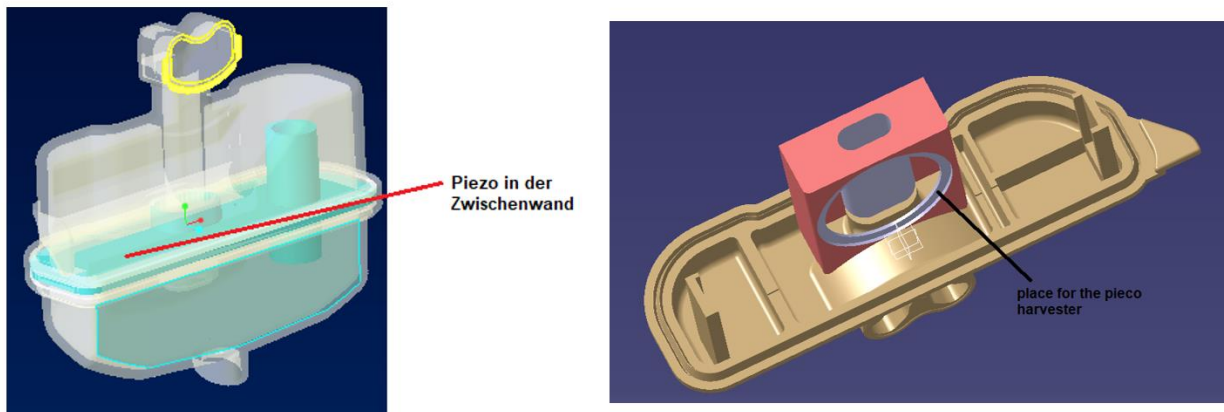


Abbildung 19: verschiedene Muffler Konzepte

Durch die Entwicklung eines neuartigen Resonatorkammer-Konzepts (Abbildung 20) wurde eine signifikante Verbesserung der Schalldämpfung und Energieernte erzielt. Die optimierte Struktur ermöglichte eine effektive Nutzung der Schwingungen, wodurch das System kontinuierlich Energie gewinnen konnte. Experimentelle Messungen bestätigten, dass das Energy Harvesting-System die zur Sensordatenerfassung erforderliche Energie zuverlässig bereitstellt, ohne die Kälteleistung oder den COP des Verdichters negativ zu beeinflussen.

Zusätzlich wurden verschiedene Prototypen unter realen Bedingungen getestet, um die Effizienz und Leistungsfähigkeit des Systems zu validieren. Dabei zeigte sich, dass die neue Schalldämpferlösung insbesondere im Frequenzbereich von 3 bis 5 kHz eine verbesserte Transmission Loss aufweist. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur Optimierung autonomer Energieversorgungssysteme in Verdichtern bei und ermöglichen eine präzisere Kontrolle akustischer Emissionen. Die Ergebnisse dieser Optimierung ist in Abbildung 20 dargestellt.

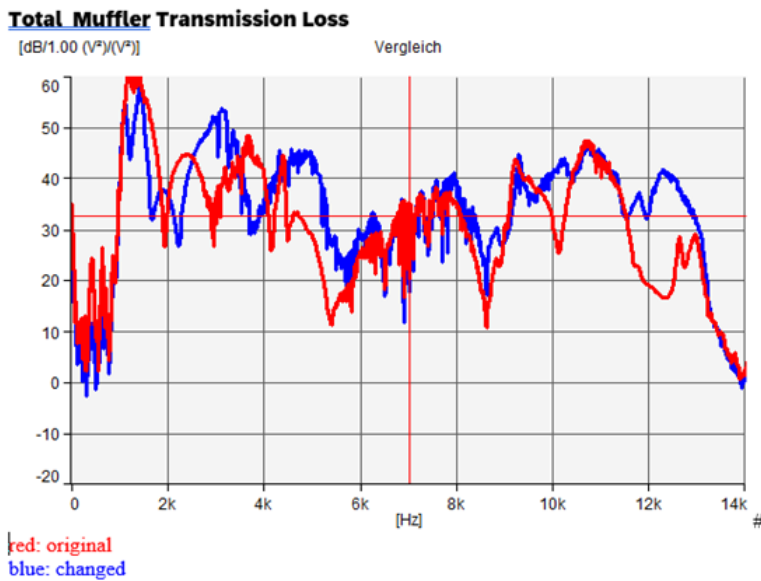


Abbildung 20: Vergleich der Mufflerdämpfung (rot: original, blau: optimiert mit Piezo))

Im Laufe des Projekts stellt sich heraus, dass durch die kontinuierliche Messung des Saugdrucks, es möglich ist, die Resonanzfrequenzen des Kompressors bewusst zu vermeiden und die Drehzahl entsprechend anzupassen. Ein von Infineon entwickelter Sensor ermöglicht die Messung des Saugdrucks mit einer Frequenz von 4 kHz, wodurch präzise Daten zur Berechnung der Resonanzfrequenz gewonnen werden. Diese Frequenz kann sich aufgrund von Temperatur- und Druckänderungen im Betrieb verschieben, sodass eine dynamische Anpassung der Drehzahl erforderlich ist, um diese Frequenzen permanent im Betrieb zu vermeiden.

Experimentelle Untersuchungen zeigten, dass eine geringfügige Drehzahländerung um 30 U/min eine Geräuschreduzierung um 6 dB bewirken kann, insbesondere wenn der Kompressor bei einer Resonanzfrequenz von etwa 800 Hz arbeitet. Messungen ergaben, dass bei 3000 U/min eine Resonanzfrequenz von 802 Hz vorliegt, und durch eine Drehzahlreduktion konnte der Geräuschpegel signifikant verbessert werden.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass durch die gezielte Anpassung der Drehzahl basierend auf kontinuierlichen Druckmessungen eine effektive Reduktion des Geräuschpegels möglich ist. Zukünftige Forschungen sollten sich darauf konzentrieren, eine optimale Regelstrategie zu entwickeln, die sowohl die akustische Leistung als auch die Energieeffizienz maximiert.

Implementierung des PCM-Materials, in ein Kühlgerät

In diesem Arbeitspaket wurde die Integration von Phasenwechselmaterialien (PCM) zur Optimierung der thermischen Stabilität und Energieeffizienz eines Liebherr Kühlschranks (interne Typbezeichnung RD504) untersucht. Ziel war es, durch gezielte Platzierung des PCM am Verdampfer die zyklische Temperaturdynamik zu beeinflussen und den Energieverbrauch zu reduzieren. Als Kühlgerät wurde dasselbe Gerät verwendet wie es auch für die thermodynamischen Simulationen zum Einsatz kam.

Aufgrund räumlicher Einschränkungen im Kühlschrankinnenraum war eine vollständige Implementierung der in Arbeitspaket 6.3 vorgesehenen 5 - 8 kg PCM nicht möglich. Abbildung 21. zeigt den grundsätzlichen Versuchsaufbau.

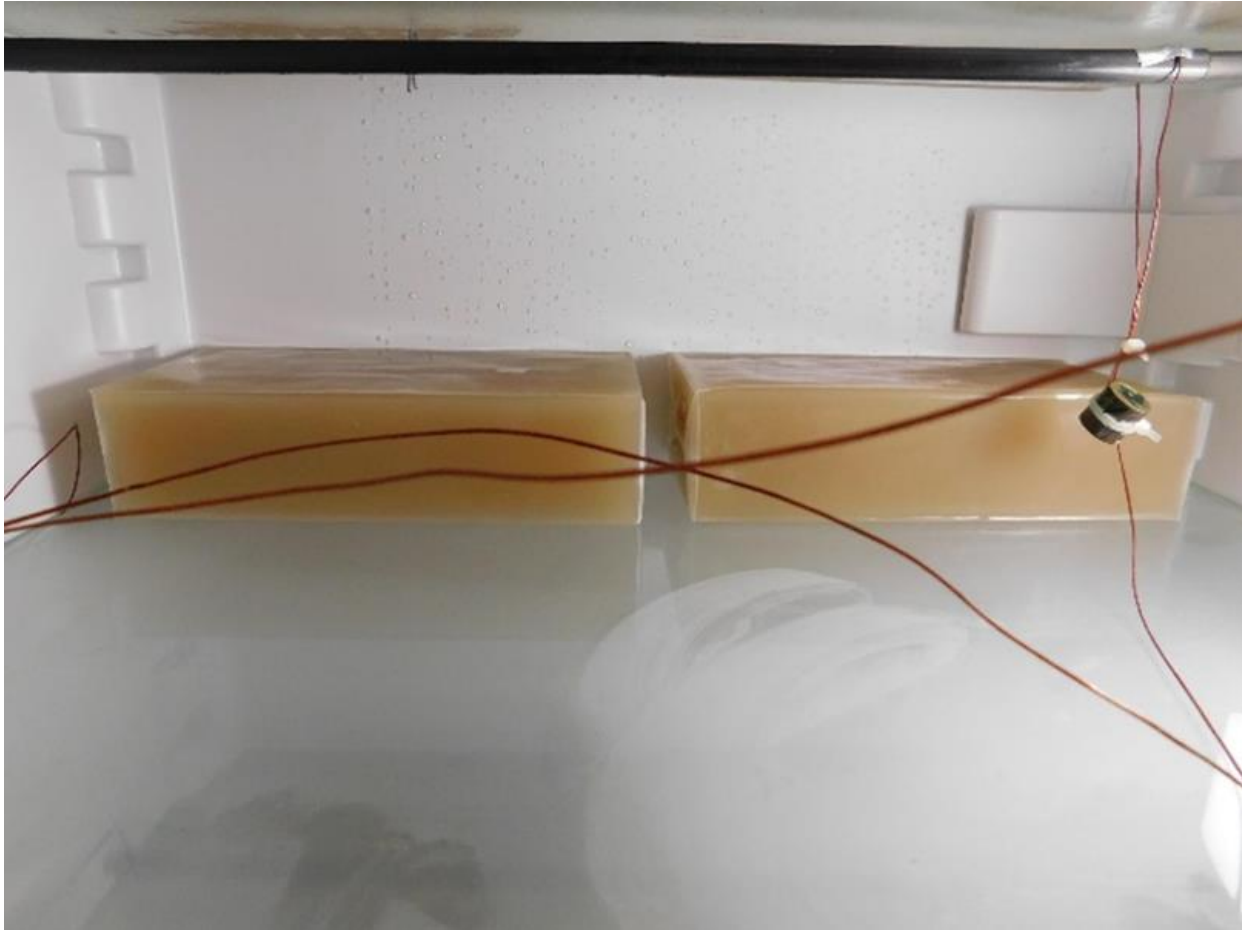


Abbildung 21: Versuchsaufbau mit PCM am Verdampfer

Dennoch konnten durch Simulationen und Vergleichsmessungen erste Erkenntnisse zur Wirkung des thermischen Ballasts gewonnen werden. In den ersten Versuchen wurden lediglich 1 kg, PCM in das System eingetragen. Die experimentellen Ergebnisse zeigen eine minimale Erhöhung des Energieverbrauchs um 0,01 kWh pro 24 Stunden, was innerhalb der systembedingten Messungenauigkeit liegt. Gleichzeitig wurde eine Verlängerung der Zykluszeiten sowie eine erhöhte Temperaturschwankung beobachtet, während die mittlere Innenraumtemperatur sank. Dasselbe Verhalten wurde auch in den Simulationen beobachtet. Um den Einfluss von mehr Mass PCM Material am Verdampfer zu untersuchen, wurden Vergleichsmessungen an einem ähnlichen Gerät mit größerem Innenraum (wodurch das Anbringen der geforderten Mengen möglich war) und leicht adaptierte Regelung durchgeführt. Dabei wurden Energieeinsparung von bis zu 5 %, erzielt. Zudem wurde eine Verzögerung des Temperaturanstiegs festgestellt, die eine netzdienliche Lastverschiebung um bis zu 15 Minuten ermöglichen könnte, ohne eine signifikante Erhöhung der Innenraumtemperatur über 0,5°C hinaus. Diese Ergebnisse decken sich mit den Simulationsbedingten Beobachtungen. In Abbildung 22 ist die Leistungsaufnahme des Kühlgeräts mit und ohne PCM (Ballast) dargestellt.

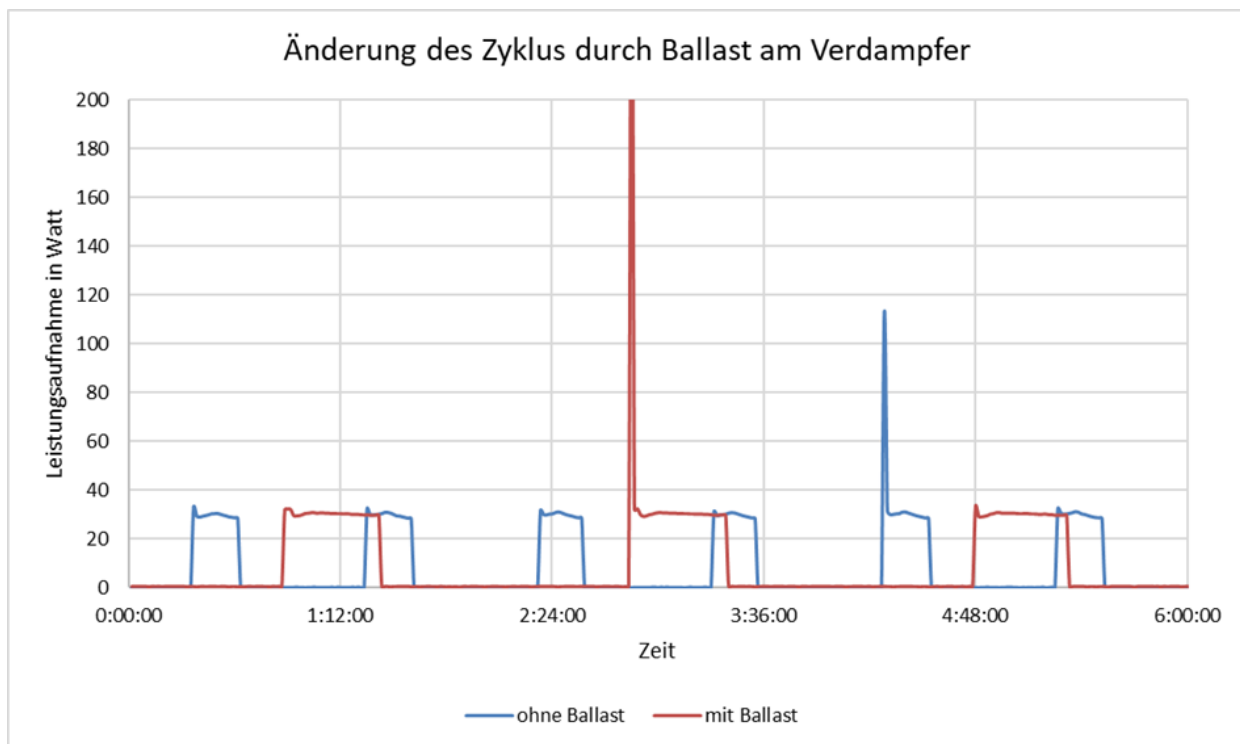


Abbildung 22: Leistungsaufnahme des Kühlgeräts mit und ohne PCM

Als ein wesentlicher Einflussfaktor stellte sich dabei die flächige Anbindung des PCM-Materials an den Verdampfer dar, je besser diese ausgeführt war, desto höher der positive Effekt des PCM-Materials. Dadurch lässt sich auch die verbleibende Abweichung zu den Simulationsergebnissen erklären, da hier eine nahezu perfekte Anbindung an den Verdampfer angenommen wurde.

Das Experiment diente ferner der Validierung gemäß neuer EU-Richtlinien für die Energieverbrauchsmessung, welche Temperaturmittelwerte bei 32°C und 16°C erfordern. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten (auch beim größeren Gerät) konnte die geplante PCM-Menge nicht vollständig integriert werden. Dennoch legen die Mess- und Simulationsergebnisse nahe, dass eine optimierte PCM-Platzierung in Kombination mit einer modifizierten Thermostatregelung substantielle Energieeinsparungen ermöglicht. Diese Erkenntnisse tragen zur Weiterentwicklung effizienter Kühlsysteme bei und eröffnen neue Perspektiven für nachhaltige Lastmanagementstrategien.

Ein weiterer Aspekt ist die Verschiebbarkeit von Lasten bzw. die kurzfristige Nutzung des Kühlgeräts als Speicher mit einer Kapazität von bis zu 150 kJ. Die nachstehende Abbildung zeigt die Ein- und Ausschaltzeiten für ein Kühlgerät bis zur Erreichung der jeweils festgelegten Maximal- und Minimaltemperaturen. Es zeigt sich, dass die Zykluszeiten für ein leeres Kühlgerät nur bei ca. 40 Minuten liegen. Durch den Einsatz von PCM Material (3 Packs ClimSel) konnte diese Zeit ca. verdoppelt werden, sodass das angestrebte Energiespeichervermögen von 150 kJ erreicht werden konnte. Durch Erhöhung der Menge an PCM Material könnte auch eine weitere Erhöhung erreicht werden. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass Erdnussöl als natürliches PCM Material eingesetzt werden kann, wobei entsprechend der Experimente mit einer Menge von 3 l die gewünschte Energiemenge über einen zulässigen Temperaturbereich von 1°C bis 8°C gespeichert werden konnte.

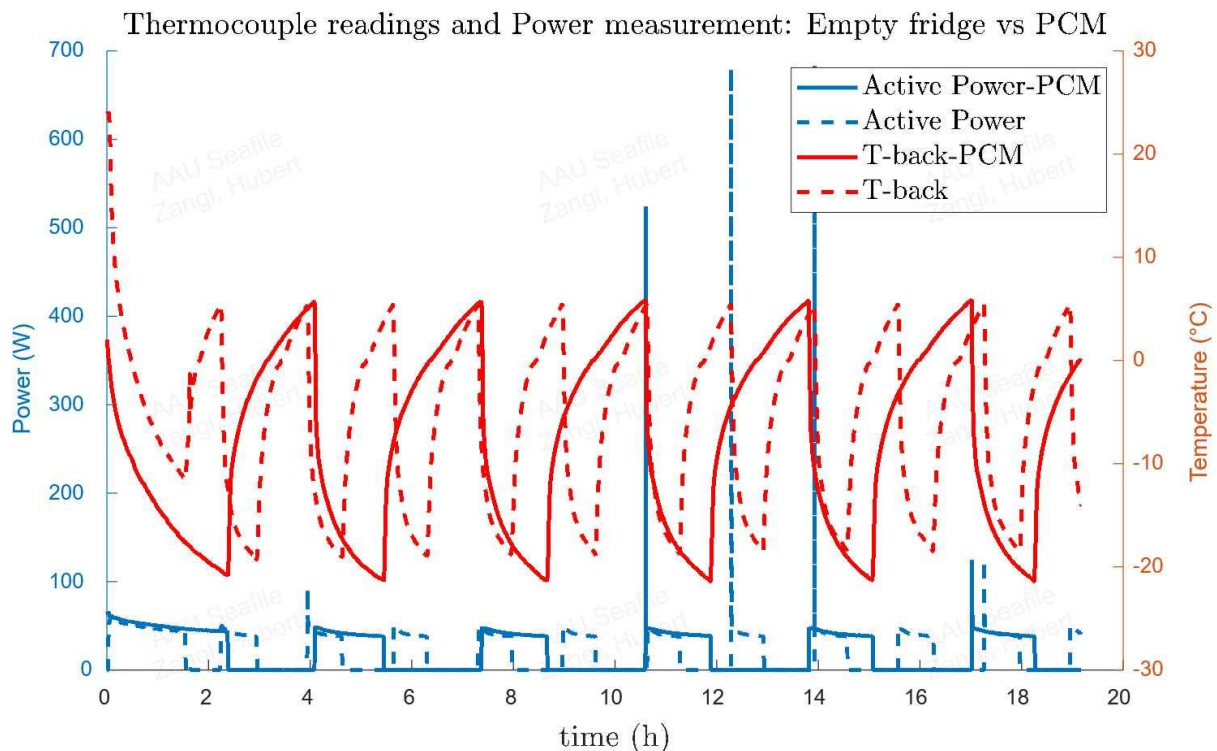


Abbildung 23: Vergleich Zykluszeiten mit und ohne PCM Material

Um das aktuell zur Verfügung stehenden Potential zur Lastverschiebung zu bestimmen, ist die Ermittlung der verbleibenden Zykluszeiten bis zur höchsten bzw. niedrigsten zulässigen Temperatur erforderlich. Da die Leistung des Kühlgerätes während des Betriebs nur wenig Änderung aufweist, ist die verbleibende maximal Zyklusdauer in die jeweilige Richtung (Betrieb bzw. Stillstand des Kompressors) der jeweiligen Energie proportional, die für die Lastverschiebung zur Verfügung steht.

Die Zyklusdauer hängt dabei von der Beladung des Kühlgeräts ab. Die Beladung umfasst dabei sowohl integrierte (und bekannte) PCM Speicher, aber auch unbekannte und schwankende Inhalte im Kühlgerät. Daher hat sich gezeigt, dass es nicht ausreichend ist, nur die Energiemengen für das PCM Material zu betrachten, sondern dass auch die Energiemengen in der sonstigen Beladung zu berücksichtigen sind. Diese sind jedoch durch Messungen, die nur das PCM Material erfassen, nicht ermittelbar.

Es wurde daher ein Modell entwickelt, dass Anhand der zeitlichen Änderungen der Temperaturen im Kühlgerät die Zykluszeiten ermittelt, wobei ein nichtlineares Modell eingesetzt wurde. Die nachstehende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Ergebnisse. Es konnte gezeigt werden, dass die mittlere Abweichung der Prädiktion deutlich unter den angestrebten 5% liegt. Dabei wurden Energieeinsparung von bis zu 5 %, erzielt. Zudem wurde eine Verzögerung des Temperaturanstiegs festgestellt, die eine netzdienliche Lastverschiebung um bis zu 15 Minuten ermöglichen könnte, ohne eine signifikante Erhöhung der Innenraumtemperatur über 0,5°C hinaus.

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Cycle Number	Error in the prediction of the cycle duration (on/off)	Error in the prediction of the energy consumption
1	3,89 % / 4,29 %	3,84 %
2	4,03 % / 7,11 %	3,49 %
3	1,88 % / 2,69 %	2,10 %
4	0,89 % / 1,73 %	1,06 %
5	4,73 % / 1,06 %	4,82 %
⋮	⋮	⋮
Average error	3,79 % / 2,56 %	3,66 %
Maximum error	8,26 % / 7,11 %	7,59 %

Abbildung 24: Übersicht zur Bestimmung der Dauer der Lastzyklen und der damit verbundenen Energie. Es konnte gezeigt werden, dass Prädiktion eine mittlere Abweichung der Prädiktion von deutlich unter den angestrebten 5% aufweist.

Die Fähigkeit aufgrund der thermischen Trägheit der Kühlgeräte und der Toleranz hinsichtlich höchst- und Tiefsttemperatur Lasten in einem gewissen Rahmen kurzfristig zu verschieben, ermöglicht die Nutzung der dynamischen Marktpreise für elektrischen Strom. Diese Marktpreise stehen beispielsweise stündlich oder viertelstündlich für einen Zeitraum von bis zu 24 Stunden im Voraus fest, sodass der Betrieb des Kühlgerätes entsprechend angepasst werden kann. Abbildung 25 zeigt einen entsprechenden Verlauf der Strompreise für einen ausgewählten Tag im Jahr 2024 und die entsprechend optimierten Betriebszeiten eines Geräts. Dies wird durch die Cloud-Anbindung des Steuergeräts ermöglicht.

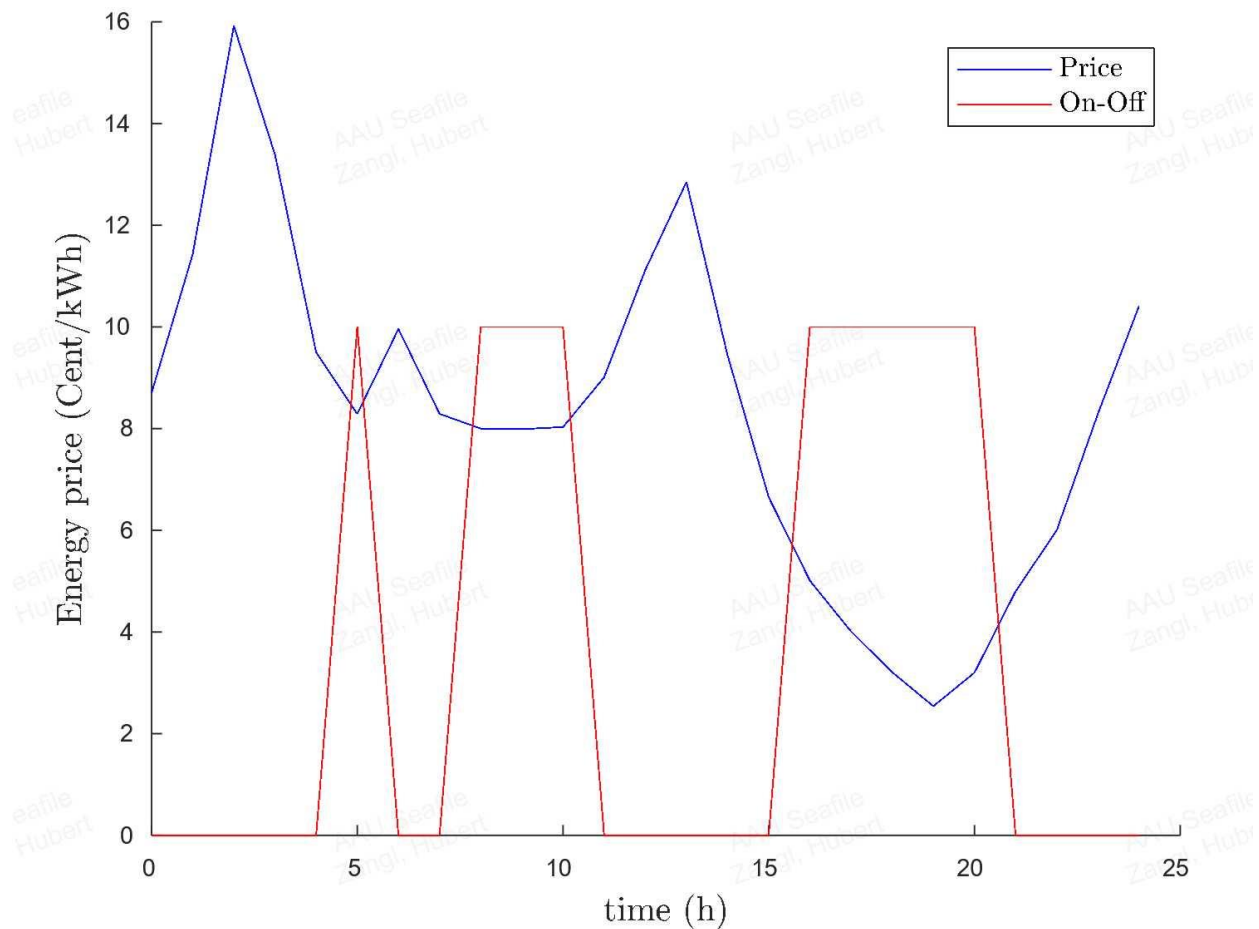


Abbildung 25: Kostenoptimierung bei dynamischen Strompreisen: Die Daten für die Kosten werden für 24h sind über 24 Stunden im voraus bekannt. Basierend darauf, kann das Kühlgerät unter Einhaltung der zulässigen Höchst- und Tiefstemperaturen die Ein- und Ausschalzeiten variiere, sodass der Betrieb verstärkt zu Zeiten geringerer Strompreisen erfolgt.

Zusammenfassend umfasste das Arbeitspaket eine umfassende messtechnische Validierung der entwickelten Systeme, die ihre Funktionalität erfolgreich unter Beweis stellten. Besonders hervorzuheben sind der Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM) zur Energieeinsparung und Laststeuerung sowie die Implementierung funkbasierter Sensorik, die eine präzisere Prozessüberwachung ermöglicht. Zukünftige Entwicklungen konzentrieren sich auf die Industrialisierung der Prototypen, insbesondere die Optimierung der Drucksignalüberwachung in Echtzeit. Dies könnte den Betrieb von Kompressoren deutlich verbessern. Der Erfolg des Projekts basierte maßgeblich auf interdisziplinärer Zusammenarbeit.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Folgenden sind die wesentlichen erreichten CloudFridge-Ergebnisse und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen zusammengefasst:

Quantitative Ergebnisse

- Demonstration der Verringerung des Energieverbrauchs von Kältekreisläufen *im Standardtestzyklus* [(EU) 2019/2016] mittels drahtloser Sensoren und vernetzter Regelung um 5 % sowie Demonstration der Reduktion des Energieverbrauchs um zirka 5% von Kühlgeräten mittels sensorbasierter Regelung sowie den erweiterten Einsatz von PCM-Material. Durch die Erkennung des Zeitpunkts einer notwendigen Enteisung kann der Zyklus entsprechend deutlich (mehr als 5%) reduziert werden.
- Demonstration eines kurzfristigen Energiespeichervermögens für einen durchschnittlichen Kühlschrank von 150 kJ / Gerät

Die Leistungsaufnahme des Kompressors im Demonstrator-Kühlschrank beträgt ca. 30 W während des Betriebs. Um ein kurzfristiges Energiespeichervermögen von 150 kJ zu erreichen, müsste daher ein Betrieb/Abschaltung über eine Dauer von ca. 83 Minuten möglich sein. Es zeigt sich, dass die Zykluszeiten für ein leeres Kühlgerät nur bei ca. 40 Minuten liegen. Durch den Einsatz von PCM Material (3 Packs ClimSel) konnte diese Zeit ca. verdoppelt werden, sodass das angestrebte Energiespeichervermögen von 150 KJ erreicht werden konnte.

- Kurzfristiges Energiespeicherpotentials mit einer Genauigkeit von besser 5%; Nachweis der Bestimmung des kurzfristigen Lastreduktionspotenzials mit einer Genauigkeit von besser 5%

Zur Ermittlung des zur Verfügung stehenden Potentials zur Lastverschiebung ist die Ermittlung der Zykluszeiten zwischen höchster und niedrigster Temperatur erforderlich. Es wurde daher ein Modell entwickelt, dass Anhand der zeitlichen Änderungen der Temperaturen im Kühlgerät die Zykluszeiten ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass die mittlere Abweichung der Prädiktion deutlich unter den angestrebten 5% liegt.

- Demonstration eines kurzfristigen Lastausgleichspotenzial für Kühlschränke mit Latentwärmespeicher in der Höhe von +/-30 W pro Gerät

Es konnte gezeigt werden, dass die Lastverschiebung möglich ist und somit z.B. die Berücksichtigung der Marktpreise bei variablen Stromkosten, die beispielsweise stündlich oder viertelstündlich für einen Zeitraum von bis zu 24 Stunden im Voraus feststehen. Aufgrund der Leistungsaufnahme von 30 W im Betrieb ist das entsprechende Lastausgleichspotential ebenfalls gezeigt.

Qualitative Ergebnisse

- Nachweis der Fähigkeit zum Lastausgleich in lokalen Netzen für Kleinsolaranlagen
Die Verwendung bei Kleinphotovoltaik-Anlagen sieht sehr ähnlich aus wie die oben beschriebene Anpassung an dynamische Marktpreise, wobei bei Vorhandensein von Energie aus der PV-Anlage der Marktpreise jeweils durch die Opportunitätskosten (Verzicht auf Einspeisevergütung) für den jeweiligen Zeitraum zu ersetzen ist.
- Detaillierte Erhebung des Potentials im Gesamtnetz und darauf basierende Vorbereitung der Verwertung der Projektergebnisse in einer netzbasierten Lösung.

Durch das Potenzial zur Leistungsverschiebung und der gezeigten Anpassung an die dynamischen Marktpreise kann der Verbrauch zu Zeiten hoher Verfügbarkeit von elektrischer Energie erhöht bzw.

bei geringer Verfügbarkeit verringert werden. Das Potenzial von 150 kJ pro Gerät skaliert somit mit der Anzahl der vernetzten Geräte, die diese Funktionalität aufweisen.

- Nachweis der autarken Funktion der Sensorsysteme

Das Zusammenspiel von Energie-Harvester, Sensorik und Kommunikation zur Umsetzung der autarken Funktion konnte erfolgreich dargestellt werden. Die generierbare Leistung des piezoelektrischen Energy Harvesters reicht aus, um einen Mess- und Sendevorgang pro 30s durchzuführen. Die Harvesting Komponente wurde in einen modifizierten Saugmuffler integriert, sodass die Messungen unter realen Betriebsbedingungen des Kompressors durchgeführt werden konnten.

- Für die Messungen am Demonstrationsgerät an der AAU wurde ein Framework zur sicheren drahtlosen Kommunikation verwendet, sodass Datensicherheit gewährleistet werden kann.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die im Projekt erarbeiteten Methoden und Technologien können als Grundlage für zukünftige Forschungsprojekte in ähnlichen Bereichen dienen. Sie eröffnen darüber hinaus neue Perspektiven in der Entwicklung energieeffizienter Systeme mit Cloud-Anbindung.

Das CloudFridge-Projekt hat wichtige technologische Grundlagen geschaffen, die nicht nur für die Kühl- und Gefriergeräteindustrie, sondern auch für andere Branchen von Interesse sein können. Die Verwertung der Ergebnisse ist ein mittelfristiges Ziel, dessen Nachhaltigkeit durch weitere Forschung, Entwicklung und Kooperationen erreicht werden soll. Mit der erwarteten Marktreife in drei Jahren wird das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz leisten und innovative Technologien für die Zukunft bereitstellen.

Die im CloudFridge-Projekt entwickelten Technologien haben gezeigt, dass durch intelligente Sensorik erhebliche Einsparungen beim Energieverbrauch erzielt werden können. Diese Ansätze haben nicht nur das Potenzial, die Effizienz von Kühl- und Gefriergeräten zu steigern, sondern können auch auf andere Anwendungen, wie beispielsweise Wärmepumpen, Heizungs- und Klimaanlageanlagen, übertragen werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Pérez, Dailys Arronde, Narendiran Anandan, und Hubert Zangl. „An Energy-Efficient Current Measurement Method for Wireless Sensors“. In *2023 IEEE SENSORS*, 1–4. Vienna, Austria: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/SENSORS56945.2023.10324937>.
- [2] Pérez, Dailys Arronde und Hubert Zangl. “Random Equivalent Compressive Sampling for Low Power Acquisition of High-Frequency Periodic Signals”, submitted to IEEE Sensors Letters
- [3] EC 62552 (2015) Household refrigerating appliances – Characteristics and test methods, part 1 – 3
- [4] The EU- energy label for the appliance is the “COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/2016”

- [5] EN IEC 60704–1 (2021): Household and similar electrical appliances – Test code for the determination of airborne acoustical noise – Part 1: General requirements
- [6] EN IEC 60704–2–14 (2013): Household and similar electrical appliances – Test code for the determination of airborne acoustical noise – Part 2-14: Particular requirements for refrigerators, frozen-food storage cabinets and food freezers
- [7] EN IEC 60704–3 (2019): Household and similar electrical appliances – Test code for the determination of airborne acoustical noise – Part 3: Procedure for determining and verifying declared emission values
- [8] EN ISO 3741 (2010): Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation test rooms

7 Kontaktdaten

ProjektleiterIn: DI Thomas Herndl

Institut/Unternehmen: Infineon Technologies Austria AG

Kontaktadresse Babenbergerstraße 10, 8020 Graz

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen

- Universität Klagenfurt - Institut für Intelligente Systemtechnologien
- eologix sensor technology gmbh
- TDK Electronics GmbH & Co KG
- Nidec Global Appliance Austria GmbH
- SES-TEC OG